

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**MATHEUS MORAES E SILVA**

**TORREFAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL  
PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO DE ÓLEO  
ESSENCIAL DE CANDEIA**

CURITIBA

2015

**MATHEUS MORAES E SILVA**

**TORREFAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO DE  
ÓLEO ESSENCIAL DE CANDEIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Graciela Bolzon de Muniz

Co-orientação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gilmara de Oliveira Machado

CURITIBA-PR

2015

---

S586

Silva, Matheus Moraes e

Torrefação de biomassa residual proveniente da extração de óleo essencial de candeia / Matheus Moraes e Silva; orientadora Graciela Bolzon de Muniz.

---- 2017.

66 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina, 2017.

1. Eremanthus erythropappus . 2. Modificação térmica. 3. Resíduo florestal . l.  
Dissertação (Mestrado) - Programa da Pós-Graduação em Bioenergia. Título.

CDD - 628

---



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Palotina  
Programa de Pós-Graduação em  
BIOENERGIA



**MESTRADO EM  
BIOENERGIA**

## PARECER

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em BIOENERGIA, Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná, após arguir o mestrando **Matheus Moraes e Silva** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**TORREFAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL DE CANDEIA**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do acadêmico, habilitando-o ao título de *Mestre* em BIOENERGIA, Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná.

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Graciela Ines Bolzon de Muniz  
Universidade Federal do Paraná  
Orientadora e presidente da banca examinadora

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Vanessa Ishikawa Rasoto  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Primeira examinadora

Prof. Dr. Paulo Rogério Pinto Rodrigues  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Segundo examinador

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Gilmar de Oliveira Machado  
Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Terceira examinadora  
Co-orientadora

Guarapuava, 03 de setembro de 2015.

Prof. Dr. Helton José Alves  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em BIOENERGIA

## ***Dedicatória***

*Aos meus pais,  
Oswaldo e Rejane,  
e irmãos,  
Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, e também para a minha formação acadêmica.

Aos meus pais Osvaldo e Rejane, pela orientação, pela dedicação, pela formação de caráter, e principalmente pelo amor e paciência. Aos irmãos, Andrea e Lucas, pelo carinho e atenção nessa jornada.

A professora Gilmara Machado, pela orientação acadêmica e confiança, pelos ensinamentos, pelo exemplo profissional, por sua dedicação sempre contagiante e pela amizade que construímos.

A professora Graciela Ines Bolzon de Muniz, pela orientação, pela troca de informações, pela confiança e pela disposição. Ao Pesquisador Washington Magalhães da Embrapa Floresta, pela contribuição e na disponibilidade da infraestrutura.

Agradeço aos meus amigos que estiveram sempre ao meu lado, que compartilharam os meus anseios e pelas palavras de conforto que me motivam diariamente para seguir em frente e compartilhar comigo as conquistas. Aos caros colegas do Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais, pela troca de conhecimento, pelo companheirismo e pelas conversas de incentivo durante o árduo processo.

## RESUMO

A biomassa residual, proveniente do processo de extração de óleo essencial de Candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish), foi submetida à modificação térmica de torrefação, para avaliar seu potencial energético como combustível em sistemas de combustão completa. A torrefação ocorre entre temperaturas de 200 à 300°C com presença parcial de oxigênio, resultando em um combustível sólido com características intermediárias entre a lenha e o carvão vegetal. Os resíduos resultantes do processo de extração do óleo de candeia foram tratados termicamente em seis temperaturas (200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C e 300°C) e em três tempos (0,5 h, 1,0 h e 1,5 h). O processo de torrefação mostrou-se eficiente, uma vez que a biomassa particulada de Candeia respondeu de forma satisfatória ao tratamento, as amostras submetidas a temperaturas próximas ao patamar final de estudo, aliado a duração de 1,0h e 1,5h apresentaram menor higroscopicidade, evidenciada por um menor teor de umidade de equilíbrio (redução de 62% em relação à testemunha) bem como maiores teores de carbono fixo (28%) e menores teores de voláteis (25%). O tratamento térmico também influenciou no incremento do teor de carbono (20%) e redução no teor de enxofre (86%), seguido pela redução nas concentrações de hidrogênio (12%) e oxigênio (25%); como consequência, houve acréscimo na emissão de CO<sub>2</sub> (21%) e redução na emissão de SO<sub>2</sub> (86%). Como fator mais importante, verificou-se que o poder calorífico útil, no teor de umidade de equilíbrio, teve um aumento de 15% com o aumento da temperatura e tempo de torrefação. Desta forma, conclui-se que a torrefação aumenta o potencial energético do resíduo tornando-o mais adequado para aplicações como combustível em sistemas térmicos.

**Palavras-Chave:** *Eremanthus erythropappus*; modificação térmica; poder calorífico; resíduo florestal.

## ABSTRACT

The extraction process of the essential oil from Candeia's tree (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) produced a biomass residue that was subjected to thermal modification named torrefaction. Torrefaction of Candeia's residue was realized to determine the effect of temperature (200, 220, 240, 260, 280 and 300°C) and time (30, 60 and 90 min) on its energetic properties to use as a fuel for complete combustion systems. We found that the gravimetric yield of torrefied biomass decreased from 83,75 % to 58,12%. The heat treatment at higher temperature and time produced the less hygroscopic sample as evidenced by an equilibrium moisture content of 62% lower than fresh biomass residue (control sample). The heat treatment also increased the carbon content (20%) and reduced sulfur content (86%) followed by additional reduction in hydrogen (12%) and oxygen concentration (25%); as a consequence, there was an increase in CO<sub>2</sub> (21%) and reduction in SO<sub>2</sub> emissions (86%). Furthermore, torrefaction produced samples of higher fixed carbon and lower levels of volatile content, reaching a maximum increase of 28% and decrease of 25%, respectively. As the most important, the net calorific value of torrefied biomass residue is about 15% higher than control. The increase of fixed carbon, carbon content together with the reduction of both equilibrium moisture and volatiles content show that this thermal treatment increases the energy content of candeia's torrefied residue that becomes a better option as biofuel.

**Key-words:** *Eremanthus erythropappus*; thermal modification; calorific value; forest residue.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	ii
LISTA DE EQUAÇÕES .....	iii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
3. REVISÃO DA LITERATURA .....	5
3.1. TORREFAÇÃO DA BIOMASSA .....	5
3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A CANDEIA – EREMANTHUS ERYTHROPAPPUS (D.C.) MACLEISH .....	7
3.2.1. MANEJO DO CANDEAL .....	9
3.2.2. EXTRAÇÃO DO ÓLEO ESSENCIAL E GERAÇÃO DE RESÍDUOS....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4.1. LOCAL DO EXPERIMENTO.....	14
4.2. MATERIAL EXPERIMENTAL .....	14
4.3. TORREFAÇÃO DA BIOMASSA .....	15
4.4. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO .....	17
4.5. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	17
4.6. ANÁLISE IMEDIATA.....	18
4.7. ANÁLISE ELEMENTAR.....	19
4.8. DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO .....	20
4.9. AJUSTE DOS MODELOS DE REGRESSÃO PROPOSTOS PARA ESTIMATIVA DE PODER CALORÍFICO.....	22
4.10. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	23
5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	25
5.1. TORREFAÇÃO DA BIOMASSA, RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E UMIDADE DE EQUILÍBRIO .....	25
5.2 ANÁLISE IMEDIATA E PODER CALORÍFICO .....	31
5.3. ANÁLISE ELEMENTAR, GASES DE COMBUSTÃO E PODER CALORÍFICO .....	38
5.4. PODER CALORÍFICO SUPERIOR .....	42
5.5. PODER CALORÍFICO ÚTIL .....	44
6. CONCLUSÃO.....	47
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	49
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXOS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ALTERAÇÕES SOFRIDAS PELOS CONSTITUINTES DA MADEIRA NO PROCESSO DE TORREFAÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (ADAPTADO DE SUNDQVIST, 2004).....	6
FIGURA 2 - MATERIAL PARTICULADO PROVENIENTE DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO ESSENCIAL. BIOMASSA SEM TRATAMENTO TÉRMICO. ....	14
FIGURA 3 - A) ESTUFA ÉTICA MODELO 400.4 UTILIZADA NOS ENSAIOS DE TORREFAÇÃO. B) EMBALAGEM DE ALUMÍNIO COM 25G DE BIOMASSA. C) INVÓLUCRO DE FOLHA DE ALUMÍNIO COM ORIFÍCIOS. ....	15
FIGURA 4- SEQUÊNCIA DE ESTUDO.....	16
FIGURA 5 - MUDANÇA DE COLORAÇÃO NOS RESÍDUOS DE CANDEIA TRATADOS EM SEIS PATAMARES DE TEMPERATURA E TRÊS COMBINAÇÕES DE TEMPO. ....	25
FIGURA 6 - INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA REDUÇÃO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....	28
FIGURA 7 - INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA REDUÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....	30
FIGURA 8 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA NA REDUÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAIS VOLÁTEIS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA. ....	34
FIGURA 9 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CARBONO FIXO DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA. ....	36
FIGURA 10 – INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CINZAS DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....	37
FIGURA 11-PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA IN NATURA E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO, DE ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA. ...	44
FIGURA 12 - PODER CALORÍFICO ÚTIL E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....	46

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA <i>IN NATURA</i> E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO, DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO CONSIDERANDO A ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA. ....	23
TABELA 2 - INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPO E TEMPERATURA SOB O RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS PARTICULADOS DE CANDEIA TORRADA EM RELAÇÃO À AMOSTRA TESTEMUNHA. ....	26
TABELA 3 - INTERAÇÃO DOS FATORES TEMPO X TEMPERATURA QUE INFLUENCIAM A REDUÇÃO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DAS PARTÍCULAS TORRADAS DE CANDEIA. ....	27
TABELA 4 - INTERAÇÃO DOS FATORES TEMPO X TEMPERATURA QUE INFLUENCIAM A REDUÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO DAS PARTÍCULAS TORRADAS DE CANDEIA. ....	29
TABELA 5 - INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA; COM PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) ESTIMADO A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA (AI) E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DETERMINADO POR BOMBA CALORIMÉTRICA (BC). ....	33
TABELA 6 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NA REDUÇÃO DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA. ....	34
Tabela 7 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NO AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE CARBONO FIXO DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA. ....	35
TABELA 8 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA. ....	37
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DA BIOMASSA <i>IN NATURA</i> E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS COM O PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) DETERMINADO POR BOMBA CALORIMÉTRICA (BC) E ESTIMADO POR EQUAÇÃO DE REGRESSÃO AJUSTADA POR MEIO DE DADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR (AE). ....	39
TABELA 10 - GASES FORMADOS NA COMBUSTÃO COMPLETA DE RESÍDUO DE CANDEIA, A PARTIR DE SUA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR. ....	41
TABELA 11- PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA <i>IN NATURA</i> E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO (PCS BC), DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO CONSIDERANDO A ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA. ....	43
TABELA 12 - PODER CALORÍFICO ÚTIL DA BIOMASSA <i>IN NATURA</i> E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA. ....	45

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Eq. 1. RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO .....	17
Eq. 2. TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO .....	18
Eq. 3. TEOR DE VOLÁTEIS.....	18
Eq. 4. TEOR DE CINZAS .....	19
Eq. 5. TEOR DE CARBONO FIXO.....	19
Eq. 6. EQUAÇÃO GENÉRICA DE COMBUSTÃO COMPLETA.....	20
Eq. 7. PODER CALORÍFICO SUPERIOR - ANÁLISE IMEDIATA.....	20
Eq. 8. PODER CALORÍFICO SUPERIOR - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR .....	21
Eq. 9. ERRO RELATIVO .....	22
Eq. 10. PODER CALORÍFICO ÚTIL.....	21

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à preocupação com o meio ambiente e visando a diminuição na geração de resíduos e gases poluentes gerados a partir da combustão dos combustíveis fósseis, as pesquisas veem buscando alternativas viáveis na geração de energia. Com isso, busca-se utilizar energias renováveis e pouco poluentes, como a biomassa vegetal. Com a crescente demanda por energia e a natureza não renovável dos combustíveis fósseis, surgem várias proposições para a utilização de novas formas de energias. A partir dessa premissa traz-se a tona as vantagens de utilizar biomassa florestal, que possui um grande potencial de aproveitamento para a utilização como energia.

A biomassa de origem pode ser definida como a fração biodegradável de produtos e resíduos gerados na floresta e que são processados para fins energéticos. Esses resíduos, proveniente da limpeza de florestas, colheita, poda e sobras resultantes dos processos industriais, podem ser beneficiadas e destinadas à produção de energia. O uso energético da biomassa pode ser de forma direta, pela combustão, ou indireta, pelos processos de conversão para a produção de combustíveis energeticamente mais densos.

Os usos da biomassa florestal são diversos, a conversão térmica do material para utilização como carvão é um dos usos mais populares da biomassa, além do material *in natura* (lenha). A aplicação de métodos de conversão ou processamento da biomassa pode potencializar algumas características, tornando a biomassa florestal um combustível de maior potencial energético. Podem-se relatar alguns processos de conversão térmica: a pirólise a altas pressões; densificação da biomassa na forma de briquetes e até a utilização de bio-óleo para geração de energia. Todos os processos com objetivo de melhorar a produtividade energética da biomassa.

Com o objetivo de implantar a biomassa florestal no setor energético de forma competitiva, pesquisadores estão desenvolvendo novas técnicas para melhorar as propriedades da madeira. Dentre os métodos aplicados, o tratamento térmico é um dos mais baratos e antigos, além de suprir a necessidade de melhorar as características da madeira, autores citam melhorias significativas em

relação à higroscopicidade, estabilidade dimensional e ataque de fungos xilófagos.

O avanço da tecnologia permitiu o desenvolvimento de produtos diversificados e obtemos combustíveis com maior poder calorífico e melhores condições de armazenamento. Mesmo que a utilização da biomassa florestal esteja apoiada principalmente no uso direto da madeira e no consumo de carvão vegetal, com essas tecnologias de conversão, é possível aumentar a aplicação energética da biomassa.

O tratamento térmico conhecido como processo de torrefação tem como princípio submeter à madeira a temperaturas geralmente entre 120 e 280°C, faixa entre a temperatura de secagem alta e torrefação, com o objetivo de promover alterações, buscando aumentar a qualidade biomassa. As propriedades da biomassa torrada variam em função do tempo e da temperatura de processamento; e para cada combinação dessas variáveis pode-se obter produtos de diferentes propriedades energéticas.

Nesse processo os polímeros de celuloses, hemiceluloses e lignina sofrem alterações químicas, a faixa de temperatura afeta a capacidade de secagem e repelência à água, obtendo da biomassa submetida ao processo térmico características como menor higroscopicidade, maior estabilidade dimensional e maior resistência biológica, no que resulta em uma biomassa intermediária entre a biomassa *in natura* e o carvão vegetal.

A principal aplicação da madeira torrada é como combustível industrial e doméstico, pois apresenta baixas emissões de fumaça durante a combustão, além de poder ser estocada por longos períodos, facilitando assim seu uso doméstico. Industrialmente, a biomassa é aplicada para a produção de eletricidade por meio da queima em caldeiras para produção de vapor.

A Candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) possui ampla aplicação na indústria de produtos dermatológicos e cosméticos, em virtude de um componente com propriedades antiflogísticas, antibacterianas, antimicóticas, dermatológicas e espasmódicas, conhecido como  $\alpha$ -bisabolol. Porém o processo de obtenção do óleo essencial gera grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos, que podem ser beneficiados e utilizados para geração de energia térmica.

Para a extração do óleo essencial da candeia a madeira seccionada em toras é classificada e separada em lotes identificados. As toras com diâmetro acima de 30 cm são rachadas e posteriormente a madeira é picada para ter sua granulometria reduzida, facilitando o processo de extração. As partículas são submetidas a vapor d'água e pressão atmosférica pré-determinada, durante aproximadamente 8 horas, no final do processo o óleo é coletado. As partículas que sofreram o processo de extração são acondicionadas, gerando acúmulo de resíduos e posteriormente são utilizadas como combustível nas caldeiras de vapor.

O trabalho foi realizado utilizando as partículas de candeia pós-extração de óleo essencial, com o objetivo de analisar as características da biomassa torrada, em diferentes combinações de tempos de residência e temperaturas de tratamento. A utilização do processo de torrefação no resíduo tem por finalidade agregar poder calorífico e alterar as características físicas do combustível, tornando-o mais atrativo energeticamente e possibilitando a utilização do resíduo, como combustível no sistema de extração de óleo essencial.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral do trabalho foi aplicar o tratamento de torrefação nos resíduos de Candeia gerados no processo extração de óleo essencial, visando à reintegração da biomassa tratada ao ciclo, como combustível modificado termicamente e de maior potencial energético.

### **2.2. Objetivos específicos**

- A. Determinar o rendimento gravimétrico para cada tratamento e o teor de umidade de equilíbrio das amostras tratadas;
- B. Avaliar a composição imediata da biomassa tratada, mediante a determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas; Avaliar a composição elementar, em relação a C- carbono, H- hidrogênio, N- nitrogênio e S- enxofre; Assim como estimar a emissão de gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$ .
- C. Determinar o poder calorífico superior em bomba calorimétrica. E estimar o poder calorífico superior e útil das amostras a partir de equação regressão.



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. Torrefação da biomassa

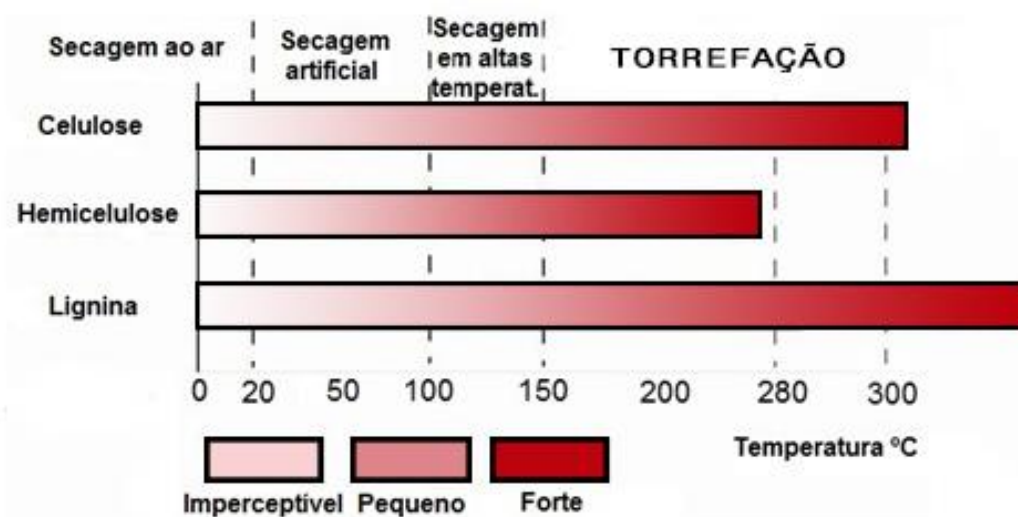
A torrefação da biomassa pode ser definida como um tratamento térmico suave, conhecida como pirólise branda, que produz um combustível com características energéticas intermediárias entre a biomassa *in natura* e o carvão vegetal. O processo se caracteriza pela ausência total ou parcial de oxigênio. Tal tratamento geralmente é realizado em atmosfera inerte, e a biomassa é submetida à baixa taxa de aquecimento com temperatura limite próximo dos 300°C. Para que o processo ocorra, a biomassa deve permanecer a uma temperatura constante, na faixa de 200°C a 280°C durante o tempo de residência pré-determinado, o processo pode ocorrer em 15 minutos ou durar até 24 horas. As combinações de tempo e temperatura dependem da espécie estudada, tamanho e quantidade de amostras, além das propriedades desejadas para o produto final. (RENDEIRO et al, 2008; BORGES e QUIRINO, 2004).

O processo de torrefação altera as propriedades físicas do combustível, influenciando diretamente na densidade, resistência e friabilidade, o caráter hidrofílico é afetado, a biomassa torrada gera um combustível que praticamente não absorve umidade, estabilizando a sua umidade de equilíbrio em torno de 3%. A madeira torrada apresenta poder calorífico maior que o da madeira e menor que o do carvão vegetal, com valores até 5.500 Kcal/kg (CORTEZ, 2008).

O calor é um dos principais recursos utilizados no processamento da biomassa. O material apresenta baixas emissões de fumaça durante a combustão, além da vantagem de poder ser estocada por períodos mais longos que a biomassa *in natura*, facilitando assim seu uso doméstico. Industrialmente, pode ser aplicada como redutor de ferro devido ao alto teor de carbono fixo e no processo de gaseificação pela obtenção de gás mais limpo (LUENGO et al, 2009).

A madeira quando submetida à ação do calor, mediante a ausência de agentes oxidantes ou catalisadores, degrada-se na faixa endotérmica da pirólise. Durante o processo ocorre perda de massa e umidade e partes dos seus constituintes são degradados. Nas faixas de temperaturas da torrefação as

hemiceluloses degradam-se mais facilmente por serem sensíveis a temperaturas superiores à 150°C, já a celulose e lignina são mais resistentes que as hemiceluloses, a degradação térmica desses ocorre com maior intensidade em temperaturas acima de 250°C. A volatilização intensa dos polímeros mais resistentes ocorre em temperaturas mais elevadas, celulose entre 240°C e 350°C e lignina entre 250°C e 300°C (FIGUEROA, 2008). Na Figura 1 podemos observar o efeito da temperatura sob os constituintes da biomassa.



**Figura 1** - Alterações sofridas pelos constituintes da madeira no processo de torrefação em função da temperatura (Adaptado de SUNDQVIST, 2004)

A hemiceluloses degrada-se primeiro, por ser menos densa e apresentar baixo peso molecular, não suporta temperaturas maiores que 220°C além de demonstrar menor estabilidade por possuir uma estrutura ramificada, o motivo pelo qual pode ser facilmente degradada (PONCSAK et al., 2006; SEVERO e TOMASELLI, 2003). Chen e Kuo (2011) observaram que a reação de degradação da hemiceluloses ocorre mais fortemente em temperaturas superiores a 260°C. Na Figura 1 observa-se que a hemiceluloses sofre alterações consideradas fortes na margem de 200°C, Rezende (2006) relata que a partir de 180 °C, ocorre a liberação da água de constituição, pela da ação da temperatura que acarreta a decomposição da celulose e hemiceluloses. A celulose, segundo Figueroa (2008) resiste até 370°C, e lignina sofre alterações em temperaturas mais elevadas que

370°C, quando o carvão vegetal é produzido. A reação de degradação da lignina ocorre de forma mais lenta, ultrapassando os limites de temperatura de torrefação, por isso por de ser considerada forte perante o tratamento térmico (ESTEVES, 2008).

A torrefação melhora as características com o aumento da temperatura de tratamento, essas alterações são acompanhadas por mudanças nas propriedades físicas. A temperatura reduz a contração e inchamento da madeira, diminuição a umidade de equilíbrio, melhora na resistência às intempéries, varia na coloração e resiste melhor ao apodrecimento (KORKUT e HIZIROGLU, 2009). Dependendo da temperatura do patamar final de tratamento, a madeira pode sofrer desidratação, despolimerização, degradação, termo-oxidação, além da mudança das propriedades mecânicas, devido às alterações químicas que os constituintes sofreram com a temperatura aplicada (PARYSEK e ZAKRZEWSKI, 2006).

Rodrigues e Rousset (2009) concluíram que o tratamento térmico trouxe mudanças significativas na biomassa de *Eucalyptus grandis* e foi eficaz para impulsionar os níveis de energia da madeira. O processo de torrefação produziu um combustível com melhores propriedades energéticas em temperaturas de 250°C e 280°C, que aumentaram o poder calorífico superior, inferior e acima de tudo, o poder calorífico útil. Pincelli (2011) tratou os resíduos da colheita de pinus e eucalipto, com temperaturas finais de 140, 180, 220, 260 e 300°C durante uma hora e concluiu que a temperatura aumentou o poder calorífico para as duas espécies, sendo maior em temperaturas acima de 220°C.

### **3.2. Considerações gerais sobre a Candeia – *Eremanthus erythropappus* (D.C.) MacLeish**

A madeira de *Candeia*, com potencial econômico, porém de pouco conhecimento sobre o cultivo, apresenta alta resistência e durabilidade, o que justifica a sua principal utilização na produção de estacas e moirões para cercas. Além deste uso, a espécie tem ampla aplicação na indústria de produtos dermatológicos e cosméticos. Com a extração do óleo essencial obtém o princípio ativo  $\alpha$ -bisabolol presente na madeira. O componente possui propriedades antiflogísticas, antibacterianas, antimicóticas, dermatológicas e espasmódicas

(PEDRALLI, 1997).

A Candeia (*E. erythropappus*) é uma espécie pioneira que se desenvolve rapidamente nos campos abertos, sendo beneficiada pela entrada de luz, formando povoamentos quase puros. A espécie pertence à família Asteraceae, pertencente ao grupo ecológico das ecótona, a altura varia entre 2 metros a 10 metros com diâmetro de até 35cm (CARVALHO, 1994). Em 2006 o mapeamento e inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais, projeto desenvolvido pela Universidade Federal de Lavras em parceria com o Instituto Estadual de Florestas, caracterizou os aspectos fisionômico-estruturais das florestas do estado, no qual se relata que as árvores de Candeia podem atingir até 25 metros de altura.

A espécie encontra-se em a América do Sul, principalmente no Brasil, em parte da Argentina e no norte e no leste do Paraguai. No Brasil a espécie está distribuída pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Goiás, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Distrito Federal (CARVALHO, 1994; PEDRALLI, TEXEIRA e NUNES, 1997). Nas áreas de ocorrência, além de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish de maneira abundante no estado de Minas Gerais, encontramos diversas outras espécies, podemos citar, *Eremanthus arboreus* (Gardner) MacLeish, *Eremanthus brasiliensis* (Gardner) MacLeish, *Eremanthus polycephalus*(DC.) MacLeish, *Eremanthus glomerulatus*Less., *Eremanthus incanus* (Less.) Less.

Pérez (2004) relata no seu estudo que a Candeia se desenvolve em locais de difícil implantação de culturas, tanto agrícolas ou mesmo outra espécie florestal. A *E. erythropappus* se desenvolve em áreas com altitude entre 900 e 1800m, em solos pouco férteis e rasos predominantemente em áreas de campos. Apesar das características não favoráveis, a candeia se desenvolve sem apresentar dificuldades de sobrevivência. A espécie está adaptada a climas com estação seca, fria bem definidas (PÉREZ, 2004; SCOLFORO et al., 2008; ARAUJO, 1994).

A espécie apresenta fuste irregular e curto, com casca rústica e grossa, acompanhada de fendas; nos galhos novos a casca torna-se mais fina. A madeira é conhecida como “madeira branca”, devido à coloração branca ou acinzentada, com vetas escura, dura, lisa. Como característica, a madeira de candeia possui

alta resistência ao apodrecimento e ao ataque de cupins e bactérias responsáveis pelo apodrecimento. Sua lenha queima com qualidade, até mesmo quando verde, a chama é clara, todavia a fumaça tem cheiro peculiar. (PEREIRA, 1998).

### 3.2.1. Manejo do Candéal

A espécie pioneira tem o período de dispersão de sementes entre os meses de agosto/novembro. Quando as condições são favoráveis, a regeneração natural pode ser intensa, as sementes necessitam de incidência de luz direta e umidade adequada para germinação. A priori a *E. erythropappus* não exige tratamento silviculturais, a utilização ou não de tratamentos depende de condições específicas do local, caso a incidência de luz seja afetada pelo sub-bosque do candéal, pode-se efetuar limpeza com a aplicação de herbicidas, roçadas ou até queima, a fim de favorecer a entrada de luz (SCOLFORO et al., 2008).

O Candéal, para uso comercial, restringe-se a áreas mais homogêneas ou nas bordas das matas, por ser uma espécie ecotono, os indivíduos se estabelecem entre as matas semidecíduais e os campos abertos do cerrado ou em campos de altitude. Por meio do banco de sementes ou pela dispersão das árvores adjacentes, através do vento, água ou animais silvestres, o candéal se forma a partir da regeneração natural. O sistema se destaca pelas pouquíssimas despesas necessárias com a implantação da regeneração (SCOLFORO et al., 2008).

A prática do manejo sustentado visa à perpetuação da área, aplicando tratamentos, de modo a aumentar produtividade, facilitar a proteção e colheita. Em específico, a regeneração da *E. erythropappus* deve ser estimulada e fazer a sua condução para gerar uma floresta potencialmente comercial, que supra a necessidade de madeira para os diversos fins.

A espécie não apresenta dificuldade de germinação, a semente inicia o processo de crescimento e diferenciação embrionária sem que haja necessidade de quebra de dormência. O sucesso da regeneração se garante quando as sementes entram em contato com o solo limpo e úmido, em uma área onde a

incidência luminosa seja intensa e a precipitação seja suficiente. Com o solo limpo, a cobertura vegetal se reconstitui de forma segura devido ao desenvolvimento das mudas e a adaptabilidade aos fatores bióticos e abióticos (SCOLFORO, et al., 2008).

Galdino et al., (2006) relata que não existe um sistema de manejo definido para a produção de madeira da espécie, independe da ocorrência ser natural ou implantado, seja eles puros ou mistos. Devido à falta de conhecimento sobre como a espécie cresce, é difícil definir a melhor maneira de cultivá-la. Os sistemas silviculturais citados por Longhi et al., (2009) visam garantir a regeneração natural da espécie, preservando o banco de sementes ou as mudas já existentes do local, conduzindo a regeneração natural nas clareias formadas pelo abate de indivíduos selecionados. A intenção é a que o desenvolvimento do candeal, a partir da regeneração, ocorra de forma satisfatória.

A madeira de candeia é explorada respeitando o número de árvores distribuídas em classes diamétricas determinadas a partir do inventário florestal. Scolforo et al., (2002) sugere que a exploração seja de maneira uniforme, e que respeite o plano de manejo determinado. Para áreas extensas, pode-se dividir o candeal em glebas. O mesmo autor observa que a exploração da candeia não é tratada como cultura, e sim como processo de extrativismo.

A Portaria nº 184 do Instituto Estadual de Floresta (IEF), de 10 de dezembro de 2004, dispõem de normas para a elaboração de Plano de Manejo para a exploração sustentada da espécie. A exploração só pode ocorrer sob a supervisão do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de Lavras (UFLA).

### **3.2.2. Extração do óleo essencial e geração de resíduos**

Em um estudo de caso no sul de Minas Gerais, Longhi et al., (2009) descreve o processo de extração do óleo essencial. Após a colheita, o processo inicial para a extração do óleo de candeia se dá, com a madeira colhida no campo já seccionada em toras classificadas e separada em lotes identificados, atendendo as normas de exigência da ISO 9002. As toras que possuem diâmetro

acima de 30 cm são processadas no rachador a fim de facilitar o processo de picagem.

Para tornar o processo de extração mais fácil e eficiente, a madeira tem sua granulometria reduzida, sem controle de tamanho de partícula, quando passada pelo picador. Posteriormente o material particulado, que possui umidade de até 30%, é seco em estufa durante 48h, à uma temperatura de 102 °C ( $\pm 3$  °C).

A madeira picada e sem classificação granulométrica é preparada para o processo de extração do óleo. Os recipientes metálicos, conhecido como dornas, são abastecidos com cavacos e fechados hermeticamente. Durante 8 horas aplica-se vapor d'água a uma pressão de 0,8 Kgf/cm<sup>2</sup>, dependendo do tamanho das partículas e da quantidade de óleo essencial contido, a pressão pode ser reajustada em até 1,8 Kgf/cm<sup>2</sup>. O vapor d'água atravessa as partículas, e por arraste, retira o óleo essencial da madeira de candeia. No final do processo o óleo é coletado e conduzido até um condensador, por meio de tubulações, e por diferença de densidade, após a condensação, o óleo separa-se naturalmente da água.

A determinação da quantidade de óleo é incerta, pois varia em função do diâmetro das árvores. Além das características da árvore, Galdino et al., (2006) relata que os caracteres ambientais, como solo, clima e altitude pode afetar diretamente no rendimento do óleo e qualidade do produto. A quantificação é duvidosa em razão da influência dos fatores. Em um trabalho realizado por Scolforo et al., (2002) o rendimento obtido na destilação do óleo de candeia foi próximo de 75% de princípio ativo alfa-bisabolol.

Com a finalidade de obter o princípio ativo alfa-bisabolol, o óleo extraído da madeira de candeia é neutralizado com solução alcalina durante o processo de destilação, no qual é submetido à pressão negativa durante 40 horas. Dessa maneira, 95% do óleo extraído é convertido em princípio ativo e os 5% restantes é denominado resina, que será acondicionado e destinado posteriormente. O princípio ativo é armazenado em recipientes plásticos com capacidade de 20 litros e exportado, principalmente para a Alemanha, para a utilização na indústria de produtos cosméticos e fármacos.

Comercialmente o princípio ativo é empregado diretamente na indústria de cosméticos e farmacológicos, Citroléo (2006) O ingrediente é utilizado em certas

formulações, principalmente em produtos de higiene e cuidados com bebê e crianças, em os produtos para pele, como bronzeadores, pós-barba, protetores solar, tonificante de pele, entre outros produtos disponíveis no mercado. Pode-se empregar o produto como fixador de perfumes, e como substituto da substância ativa da camomila, azuleno, em produtos de higiene, para profilaxia e cuidados para pele. O princípio ativo alfa bisabolol apresenta estabilidade química, sem sofrer degradação ou decomposição quando incorporado em formulações cosméticas. O líquido é transparente, levemente amarelado e não possui sabor, possui aroma característico. Citroléo (2006) descreve as substâncias presentes no óleo bruto extraído da candeia, além do princípio ativo de maior interesse comercial,  $\alpha$ -bisabolol, o óleo é composto de ácido esovalérico, alfa e beta bisabolenos e óxido de bisabolenos.

O preço do produto final pode chegar em US\$ 27,00 e US\$ 60,00 por quilo, de óleo bruto e do princípio ativo alfa-bisabolol, respectivamente, no mercado nacional e internacional (SCOLFARO et al., 2007). Estima-se que o Brasil produza cerca de 170 mil quilos/óleo/ano, nas indústrias de óleo essencial de candeia natural bruto, sendo grande parte exportada para os países da Europa. O princípio ativo  $\alpha$ -bisabolol é processado por três indústrias brasileiras, por destilação, e distribuído para compor as formulações de produtos cosméticos, como, cremes dentais, protetores solares, loções pós-barba, entre outros (MORI et al., 2003).

Após a retirada do óleo essencial da madeira de Candeia, as partículas que sofreram o processo de extração são transportadas e armazenadas até o pátio. Uma parte dos resíduos é utilizada como biomassa na caldeira, para fornecer energia térmica ao processo de extração e a outra parte dos resíduos é deixada nos pátios gerando problemas de acumulação e contaminação do ambiente. Segundo Wiecheteck (2009) os resíduos que são gerados durante a colheita florestal até o processamento mecânico da madeira têm sido destinados para o aproveitamento energético na geração de energia térmica e/ou na cogeração de energia elétrica, sendo que na maioria das vezes os resíduos são utilizados como combustível na caldeira para produção de vapor em processos de secagem. Uma das principais vantagens da utilização de resíduos como combustível, é que o seu uso pode ser feito diretamente, por meio da combustão,



outra vantagem é a emissão de gases poluentes, que são consideradas balanceadas devido à absorção de dióxido de carbono no processo de fotossíntese (MULER, 2008).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Local do experimento

O experimento foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais do curso de Engenharia Florestal – UNICENTRO, *campus* Irati, Paraná, Brasil.

### 4.2. Material experimental

Para esse estudo foi utilizado material particulado sem granulometria definida proveniente do processo de extração de óleo essencial de Candeia (*Eremanthus erythropappus*). As partículas foram cedidas por uma empresa especializada em extração de óleo vegetal para a produção de alfabisabolol. (Figura 2).



Figura 2 - Material particulado proveniente do processo de extração de óleo essencial. Biomassa sem tratamento térmico.

### 4.3. Torrefação da biomassa

O material particulado foi submetido aos ensaios de torrefação em estufa Ética, modelo 400.4, dotada de sistema de aquecimento por resistência elétrica sem circulação de ar interno (Figura 3 – A). As partículas foram depositadas em embalagens de alumínio com capacidade de 150ml, fechadas com folha de alumínio para evitar o contato com o oxigênio (Figura 3 – B). Nas folhas de alumínio foram feitos orifícios com diâmetro inferior a 01 cm para facilitar a evaporação da água higroscópica e a volatilização dos componentes (Figura 3 - C).

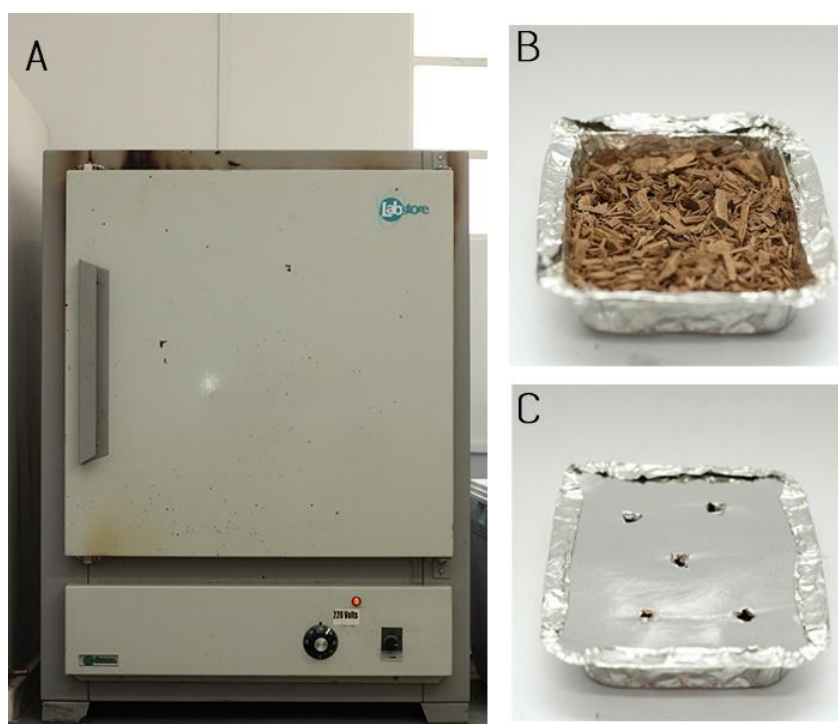


Figura 3 - A) Estufa Ética modelo 400.4 utilizada nos ensaios de torrefação. B) Embalagem de alumínio com 25g de biomassa. C) Invólucro de folha de alumínio com orifícios.

O delineamento experimental foi composto por seis temperaturas distintas e três tempos de tratamento. O material foi submetido à torrefação nas seguintes temperaturas, 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C e 300°C, com tempos de tratamento fixados em 0,5h, 1h e 1,5h, o que totaliza 18 tratamentos térmicos.

Foram realizadas quatro repetições, cada amostra continha 25g de material particulado de dimensões variadas.

Após a torrefação do material, as partículas foram resfriadas em dessecador, pesadas e armazenadas em sacos plásticos hermeticamente fechados para evitar o contato direto com o ar. Os métodos foram aplicados conforme a sequência da figura 4.

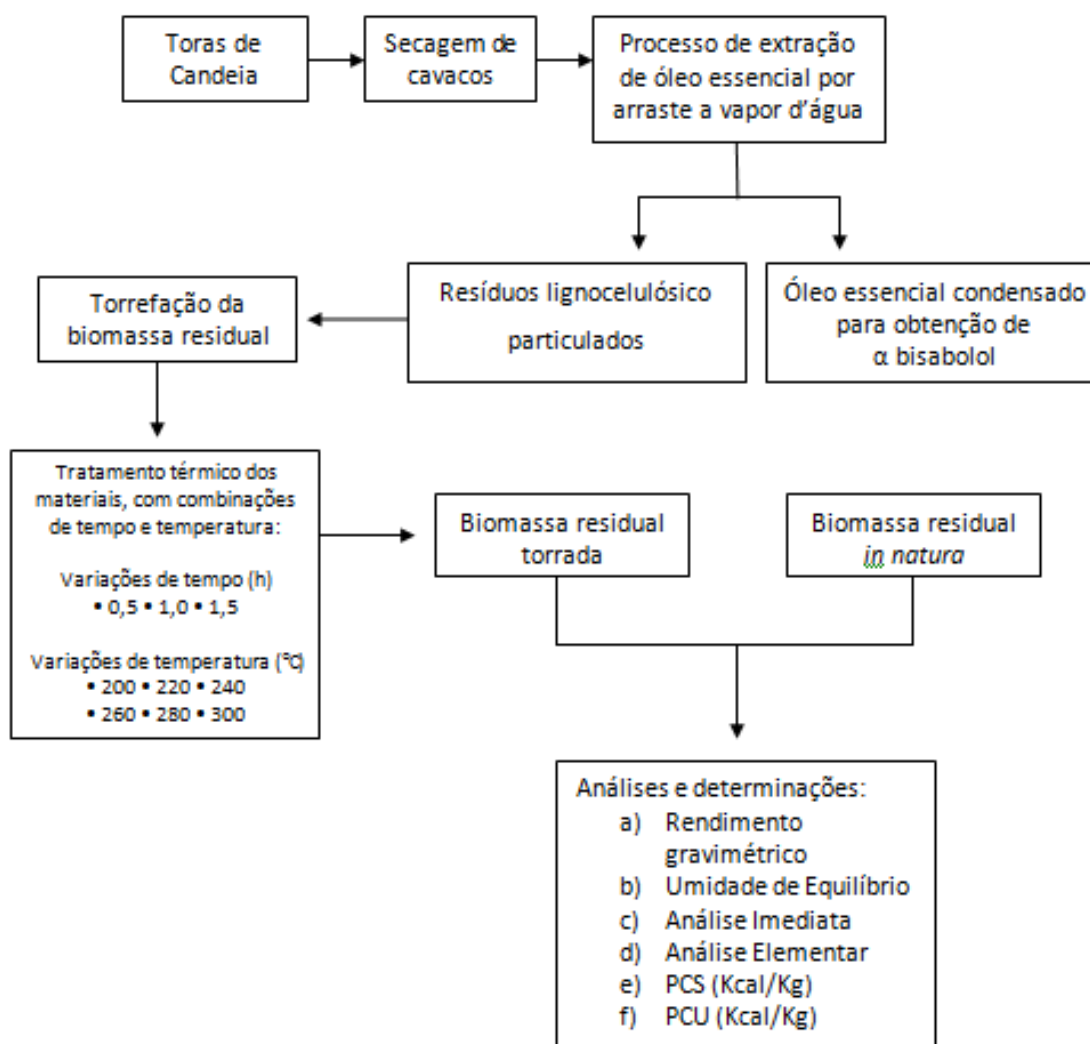


Figura 4- Sequência de estudo

#### 4.4. Determinação do rendimento gravimétrico

O rendimento gravimétrico dos tratamentos térmicos do material particulado foram obtidos através da relação entre a quantidade de massa do material após a torrefação e a quantidade de massa inicial do material, conforme a Equação 1.

$$\%RG = \left( \frac{mf}{mi} \right) \times 100 \quad (1)$$

%RG = Rendimento Gravimétrico (%)

mf = Massa da amostra após torrefação (g)

mi = Massa inicial da amostra (g)

#### 4.5. Determinação da umidade de equilíbrio

As amostras *in natura* e as amostras tratadas foram submetidas às condições ambientais para equilíbrio de umidade, com o intuito de determinar o comportamento. Durante 15 dias as amostras foram expostas as condições ambientais, com monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar. Para a amostra *in natura* e para cada amostra dos tratamentos foram realizadas três repetições.

Para o cálculo da umidade de equilíbrio em base seca foi utilizada a seguinte equação.

$$\%UE = \left( \frac{mi - mf}{mf} \right) \times 100 \quad (2)$$

%UE = Umidade de equilíbrio (%)

mi = Massa inicial da amostra (g)

mf = Massa seca da amostra (g)

#### 4.6. Análise imediata

Para determinar a análise imediata do material torrado adequou-se a metodologia de acordo com a norma ASTM E872-82 (2006). Para a realização da análise imediata o material torrado foi moído em moinho do tipo Willye, modelo TE-650, para reduzir a sua granulometria. Após o processo de moagem o material foi peneirado em malha de 42 mesh, em seguida colocou-se 4,0 g de serragem remanescente em cadinhos de 25 mL, com tampa, previamente secos e tarados, no forno mufla, marca Nova modelo MI 1384 aquecida a 600°C durante 10 minutos. Foram realizadas três repetições para cada tratamento térmico e para a amostra testemunha. Determinou-se a porcentagem de materiais voláteis de acordo com a seguinte equação (3):

$$\%Voláteis = \left( \frac{(mi - mf)}{mi} \right) \times 100 \quad (3)$$

%Voláteis = Teor de voláteis (%)

mi = Massa inicial da amostra (g)

mf = Massa final da amostra após 10 min à 600°C

Para a determinação da porcentagem do teor de cinzas, adequou-se a metodologia de acordo com a norma ASTM D1102-84 (2007), o material moído e

peneirado foi colocado em cadinhos de 25 mL previamente secos, tarados e fechados com tampa. Cada cadinho continha 4 g de serragem, em seguida os cadinhos foram colocados em forno mufla, marca Nova modelo MI 1384, à 750°C durante 6 horas. Foi realizado três repetições para cada tratamento térmico e para a amostra *in natura*. O resfriamento do material se deu dentro do equipamento, até temperatura ambiente. Determinou-se o teor de cinzas a partir da seguinte equação (4):

$$\% \text{Cinzas} = \left( \frac{mr}{mi} \right) \times 100 \quad (4)$$

%Cinzas = Teor de cinzas (%)

mi = Massa inicial da amostra (g)

mr = Massa residual da amostra após 6h à 750°C

A quantidade de carbono fixo das amostras foi determinada pela diferença entre o valor percentual do teor de voláteis e do teor de cinzas subtraído de 100. O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado através da seguinte equação (5):

$$\% \text{CFixo} = 100 - (\% \text{Cinzas} + \% \text{Voláteis}) \quad (5)$$

%Cfixo = Teor de carbono fixo (%)

%Cinzas = Teor de cinzas (%)

%Voláteis = Teor de voláteis (%)

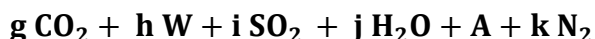
#### 4.7. Análise elementar

Para a análise química elementar, as amostras foram moídas e selecionadas em peneira de 42 mesh. As amostras foram submetidas à análise de CHNS-O, onde os seus componentes foram individualizados numa seqüência induzida de acordo com a massa molecular de cada um. Os dados foram

processados pela Embrapa Floresta – Colombo – PR. O valor de oxigênio foi quantificado pela diferença do somatório do C, N, H e S com o total de 100%. Os coeficientes da equação de combustão completa (6) foram balanceados a partir da análise elementar, que possibilitou a estimativa dos produtos CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.



↓



(6)

Onde: a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k são os coeficientes da equação de combustão completa, utilizando o ar como fonte de oxigênio (O<sub>2</sub> + 3,76 N<sub>2</sub>); sendo C para carbono, H para hidrogênio, O para oxigênio, N para nitrogênio, S para enxofre, W para teor de umidade de equilíbrio e A para cinzas. Os produtos são CO<sub>2</sub> para gás carbônico, SO<sub>2</sub> para dióxido de enxofre, H<sub>2</sub>O para a água proveniente da queima do hidrogênio e N<sub>2</sub> para gás nitrogênio.

#### 4.8. Determinação do poder calorífico

O poder calorífico superior das amostras foi estimado por meio da equação ajustada por regressão proposta por Parikh et al.,(2005) (7); e pela análise elementar utilizando a equação desenvolvida pela Agência Internacional de Energia (8). O PCS também foi determinado, pela bomba calorimétrica IKA C200. O poder calorífico útil (BRITO, 1993) (9) foi estimado a partir do PCS da análise imediata e da análise elementar, considerando a umidade de equilíbrio da amostra.

$$PCS A. I. = (84,5104 \times \%CFixo) + (37,2601 \times \% Voláteis) + (1,8642 \times \%Cinzas)$$

(7)

PCS = Poder calorífico superior análise imediata (Kg/kcal)

%Cfixo = Teor de carbono fixo (%)

%Cinzas = Teor de cinzas (%)



%Voláteis = Teor de voláteis (%)

$$\text{PCS}_{\text{C.E.}} = 83,4349 \text{ C} + 281,6137 \text{ H} + 24,0195 \text{ S} - 3,6089 \text{ N} - 24,7126 \text{ O} - 5,0429 \text{ A}$$

(8)

PSC = Poder calorífico superior composição elementar (Kcal/kg)

%C = Concentração de Carbono

%H = Concentração de Hidrogênio

%S = Concentração de Enxofre

%N = Concentração de Nitrogênio

%O = Concentração de Oxigênio

%A = Teor de cinzas base seca

$$\text{PCU} = [\text{PCS} - (600 \times 0,09 \times \text{H}\%)] \times [1 - (0,01 \times \text{U}\%)] - (600 \times 0,01 \times \text{U}\%)$$

(9)

PCU = Poder Calorífico Útil (Kcal/Kg)

PSC = Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg)

H% = Concentração de Hidrogênio

U% = Teor de umidade de equilíbrio

#### 4.9. Ajuste dos modelos de regressão propostos para estimativa de Poder Calorífico

De posse dos valores estimados e determinado, foi realizado o cálculo de erro relativo percentual (10) tomando como valor real o PCS determinado por bomba calorimétrica.

$$E(\%) = \left( \frac{\text{PCS Real} - \text{PCS Estimado}}{\text{PCS Real}} \right) \times 100$$

(10)

E% = Erro relativo percentual

PCS Ajustado = Poder Calorífico Análise Imediata / Poder Calorífico Comp. Elementar

PCS Real = Poder Calorífico obtido a partir de bomba calorimétrica

Na Tabela 1 observa-se que o erro relativo em módulo do poder calorífico determinado pela análise imediata é menor, quando comparado ao erro relativo do poder calorífico estimado pela composição elementar. A estimativa do poder calorífico a partir da análise elementar expressou valores acima do valor real determinado por bomba calorimétrica, nesse caso, a equação de regressão proposta por Parikh et al.,(2005), se aproxima com maior veracidade ao valor real do PCS determinado.

**TABELA 1** - PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA *IN NATURA* E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO, DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO CONSIDERANDO A ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA.

		PCS CALORÍMETRO (Kcal/kg) (1)	PCS IMEDIATA (Kcal/kg) (2) *	ERRO % *	PCS ELEMENTAR (Kcal/kg) (3) **	ERRO % **
Testemunha		4688	4842± 46 b	3,29	5046	7,64
200°C	0,5 h	4710	4629± 52 c	1,73	5081	7,88
220°C	0,5 h	4701	4849 ± 71 b	3,16	5156	9,67
240°C	0,5 h	4591	4817 ± 67 b	4,93	5127	11,67
260°C	0,5 h	4579	4881 ± 44 b	6,59	5190	13,35
280°C	0,5 h	4581	4924 ± 47 ab	7,50	5207	13,67
300°C	0,5 h	4948	4938 ± 41 ab	0,20	5355	8,22
200°C	1,0 h	4868	4836 ± 70 b	0,66	5197	6,76
220°C	1,0 h	4783	4431 ± 14 d	7,35	5212	8,97
240°C	1,0 h	4720	4817 ± 18 b	2,05	5218	10,56
260°C	1,0 h	4866	4924 ± 61 ab	1,19	5259	8,07
280°C	1,0 h	4922	4956 ± 62 ab	0,68	5377	9,24
300°C	1,0 h	5313	5091 ± 55 a	4,18	5571	4,86
200°C	1,5 h	4806	4861 ± 66 b	1,15	5191	8,00
220°C	1,5 h	4788	4910 ±77 b	2,55	5240	9,44
240°C	1,5 h	4913	4988 ±75 ab	1,52	5362	9,15
260°C	1,5 h	4967	4862 ± 52 b	2,12	5278	6,26
280°C	1,5 h	5172	4908 ± 83 b	5,11	5362	3,67
300°C	1,5 h	5580	4968 ± 48 ab	10,97	5445	2,42
			Média E%	3,52±2,9 a		8,39 ±2,9 b

(1) Poder calorífico obtido por bomba calorimétrica; (2) Poder calorífico obtido pela análise elemental da biomassa; Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. (3) Poder calorífico obtido pela composição elemental da biomassa. \* Erro% relativo à PCS (2): PCS (1); \*\* Erro% relativo à PCS (3): PSC (1). Média do Erro% Foi aplicado teste F. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si

#### 4.10. Análise estatística

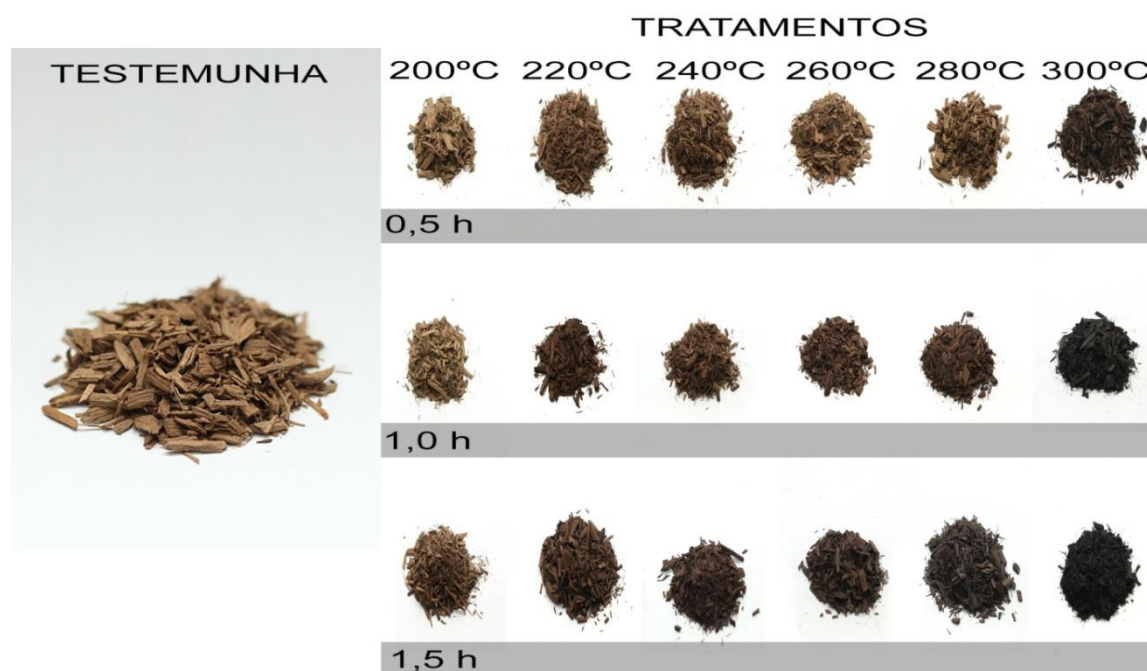
As médias dos testes foram submetidas a análise de variância (ANOVA) e comparados entre si pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade e utilizou-se um arranjo fatorial num delineamento inteiramente casualizado com propósito de verificar a influencia dos fatores dos tratamentos térmicos aplicados nesses ensaios e a interação entre eles. Adicionalmente foi proposto um modelo

de ajuste dos dados para o rendimento gravimétrico e umidade de equilíbrio, com nível de significância de 5%. Para a análise estatística foi utilizado o software livre Assistat 7.7 beta e o Excell.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1. Torrefação da Biomassa, Rendimento gravimétrico e Umidade de Equilíbrio

O processo de torrefação interfere nas propriedades energéticas da biomassa de acordo com a combinação do tempo de residência e temperatura de tratamento. A Figura 4 demonstra a mudança de coloração das amostras torradas de Candeia em seis temperaturas e três combinações do tempo, onde visivelmente observa-se que tratamentos realizados em maiores tempos e temperaturas promovem uma transição de tonalidade do marrom para o preto, quando comparadas com a biomassa testemunha *in natura*. Segundo Jones e Hill (2007), entre as propriedades que são modificadas pelo tratamento com calor, incluem-se a mudança na coloração, a qual transita entre marrom e preta. Moura e Brito (2011) submeteram peças de madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, e também constataram que incremento da temperatura causa escurecimento das amostras, o qual se torna mais drástica a partir de tratamentos à 180°C.



**FIGURA 5** - MUDANÇA DE COLORAÇÃO NOS RESÍDUOS DE CANDEIA TRATADOS EM SEIS PATAMARES DE TEMPERATURA E TRÊS COMBINAÇÕES DE TEMPO.

Os dados do rendimento gravimétrico e umidade de equilíbrio dos resíduos de Candeia torrados estão descritos na Tabela 2, onde observa-se que os fatores tempo e temperatura do processo de torrefação acarretaram tendência de redução no rendimento gravimétrico e umidade de equilíbrio das amostras. Os resultados mostram que o tratamento térmico foi capaz de reduzir em 30% o rendimento gravimétrico, quando o referencial são os dois extremos do tratamento (0,5h; 200°C – 1,5h; 300°C), e 60% a umidade de equilíbrio, quando se compara com a amostra testemunha.

**TABELA 2 - INFLUÊNCIA DOS FATORES TEMPO E TEMPERATURA SOB O RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS PARTICULADOS DE CANDEIA TORRADA EM RELAÇÃO À AMOSTRA TESTEMUNHA.**

		<b>Rendimento Gravimétrico (%)</b>	<b>Umidade de Eq. (%)</b>
<b>Testemunha</b>		--	15,62 ±1,03ab
<b>Tratamentos</b>			
<b>0,5 h</b>	<b>200°C</b>	83,75 ±0,00 a	8,95 ±0,15 ef
<b>0,5 h</b>	<b>220°C</b>	80,30 ±1,97 a	14,56 ±0,22 abc
<b>0,5 h</b>	<b>240°C</b>	79,34 ±0,00 ab	13,76 ±0,05 abcd
<b>0,5 h</b>	<b>260°C</b>	77,63±0,00 ab	15,61 ±0,32 ab
<b>0,5 h</b>	<b>280°C</b>	76,01±0,00 ab	17,37 ±0,13 a
<b>0,5 h</b>	<b>300°C</b>	74,30 ±7,38 a	10,47 ±0,18 de
<b>1,0 h</b>	<b>200°C</b>	80,36 ±1,77 a	11,7 ±0,11 cde
<b>1,0 h</b>	<b>220°C</b>	78,49 ±0,00 ab	14,7 ±0,18 abc
<b>1,0 h</b>	<b>240°C</b>	79,68 ±1,75 ab	12,43 ±0,24 bcde
<b>1,0 h</b>	<b>260°C</b>	78,20 ±0,00 ab	11,13 ±0,02 cde
<b>1,0 h</b>	<b>280°C</b>	78,20 ±4,57 ab	11,48 ±0,03 cde
<b>1,0 h</b>	<b>300°C</b>	62,98 ±9,89 cd	6,00 ±0,10 f
<b>1,5 h</b>	<b>200°C</b>	79,84 ±3,44 ab	10,99 ±0,27cde
<b>1,5 h</b>	<b>220°C</b>	78,32 ±2,91 ab	10,29 ±0,06de
<b>1,5 h</b>	<b>240°C</b>	81,06 ±1,82 a	8,92 ±0,16 ef
<b>1,5 h</b>	<b>260°C</b>	76,25 ±4,19 ab	9,22 ±0,03 ef
<b>1,5 h</b>	<b>280°C</b>	70,51 ±2,96 bc	9,59 ±0,10ef
<b>1,5 h</b>	<b>300°C</b>	58,12 ±6,50 d	6,25 ±0,25 f

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Para comparação dos fatores tempo e temperatura foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 3x6. Os dados refletem a interação entre o tempo e a temperatura sob os parâmetros analisados. Na Tabela 3 observa-se que para temperaturas mais altas o rendimento gravimétrico é menor devido a maior perda de massa, e em razão do maior tempo de exposição da madeira sob a ação do calor. Rousset et al., (2011) observa que as mudanças ocorridas na madeira são decorrentes da decomposição das hemiceluloses, por ser mais sensível a temperaturas elevadas, já Yildiz et al., (2006) relata que quanto maior a temperatura de torrefação maior será a perda de massa do resíduo, devido a degradação térmica dos constituintes da madeira, que conseqüentemente reflete em um rendimento gravimétrico menor.

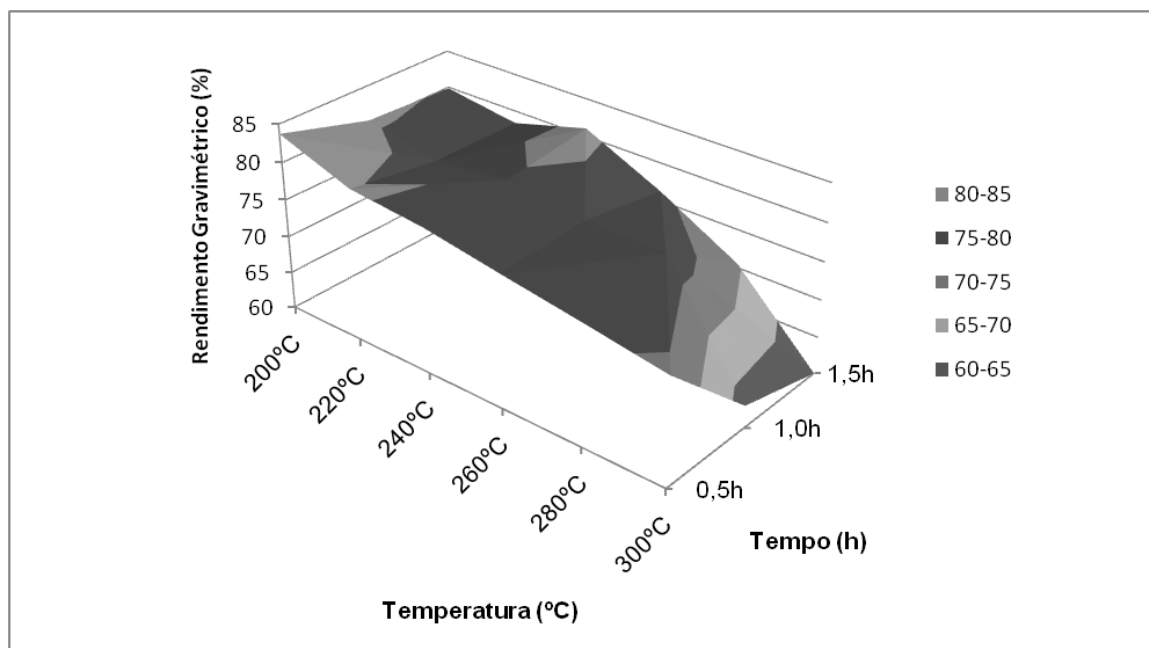
**TABELA 3** - INTERAÇÃO DOS FATORES TEMPO X TEMPERATURA QUE INFLUENCIAM A REDUÇÃO DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DAS PARTÍCULAS TORRADAS DE CANDEIA.

Tratamentos	RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO (%)					
	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
<b>0,5 h</b>	83,75 aA	80,3 aAB	79,34 aAB	77,63 aAB	76,01 abAB	74,30 aB
<b>1,0 h</b>	80,36 aA	78,49 aA	79,68 aA	78,20 aA	78,20 aA	62,98 bB
<b>1,5 h</b>	79,84 aA	78,32 aA	81,06 aA	76,25 aAB	70,51 bB	58,12 bC

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Existe interação entre os fatores ao nível de 1% e probabilidade. Linhas: letras minúsculas; Colunas: letras maiúsculas.

Para a madeira de eucalipto Rodrigues e Rousset (2009) realizaram o processo de torrefação nas temperaturas de 220°C, 250°C e 280°C, e o rendimento gravimétrico apresentou tendência de redução, conforme aumento da temperatura, nesse experimento não houve variação do tempo de tratamento. O tempo de tratamento tem influencia sobre o parâmetro em questão, as amostras tratadas durante 1,5h apresentam rendimento gravimétrico cerca de 20% menor que as amostras tratadas em tempos menores. Nota-se a influencia dos dois fatores (tempo e temperatura) na redução gradual do rendimento gravimétrico. A análise estatística apresentou significância na interação dos fatores. Sendo assim, os resultados mostram que existe influência decisiva da interação entre temperatura x tempo de tratamento no rendimento gravimétrico dos produtos obtidos após a torrefação, que resulta na perda de massa do combustível,

expressando até 40% menos na quantidade de resíduo que seria acumulado. Na Figura 6 observa-se o comportamento dos fatores sob o rendimento gravimétrico nas diferentes combinações de temperatura e tempo.



**Figura 6** - Influência do tempo e temperatura na redução do Rendimento Gravimétrico dos resíduos de Candeia submetidos ao processo de torrefação.

As amostras de biomassa torrada foram submetidas a condições ambientais controladas, com temperatura média de  $20,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3,45$  e umidade relativa do ar média em  $73,8\% \pm 6,80$ , até estabilizar a umidade com o ambiente. Na Tabela 2 observa-se que existe a tendência significativa de redução da umidade de equilíbrio higroscópico das partículas de biomassa de acordo com a variação da temperatura e tempo de torrefação. A Tabela 4 expressa a interação entre esses fatores.

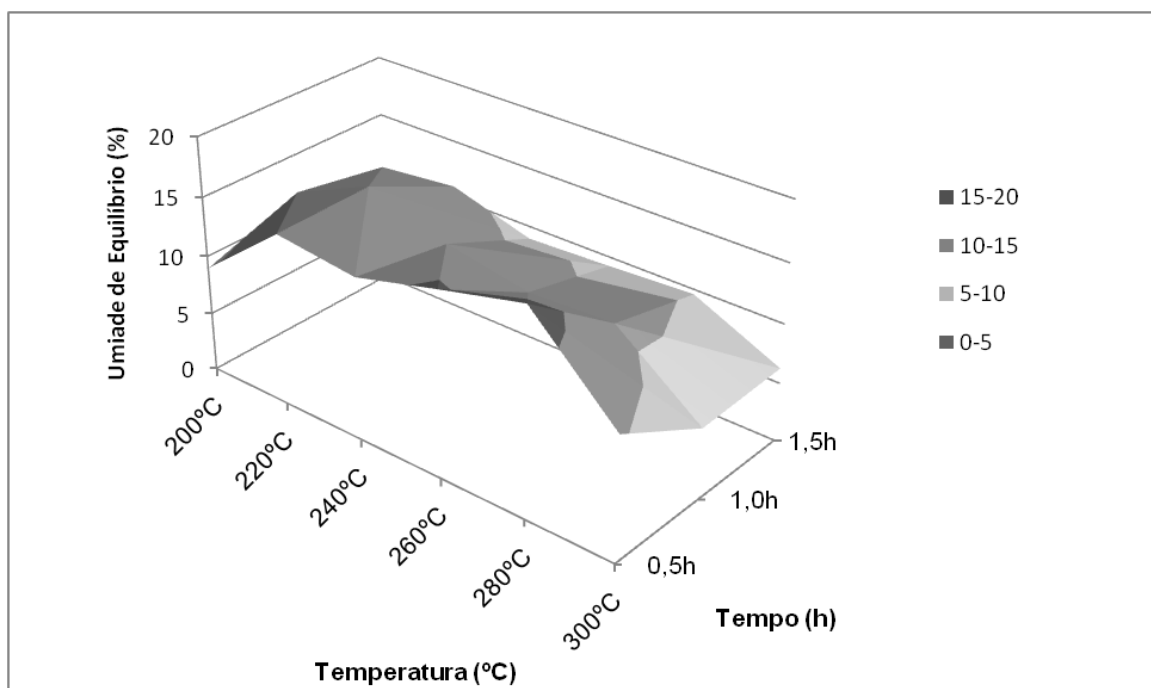


**TABELA 4** - INTERAÇÃO DOS FATORES TEMPO X TEMPERATURA QUE INFLUENCIAM A REDUÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO DAS PARTÍCULAS TORRADAS DE CANDEIA.

Tratamentos	UMIDADE DE EQUILÍBRIO (%)					
	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
<b>0,5 h</b>	8.95 bC	14.56 aAB	13.76 aB	15.61 aAB	17.37 aA	10.47 aC
<b>1,0 h</b>	11.7 aAB	14.7 aA	12.43 aAB	11.13 bB	11.48 bB	6.00 bC
<b>1,5 h</b>	10.99 abA	10.29 bA	8.92 bAB	9.22 bAB	9.59 bA	6.25 bB

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Existe interação entre os fatores ao nível de 1% de probabilidade. Linhas: letras minúsculas; Colunas: letras maiúsculas.

As amostras tratadas (Tabela 4) atingem um teor de equilíbrio menor do que a amostra não tratada. A madeira *in natura*, não tratada, apresenta 15,62%  $\pm$  1,03 de teor de umidade inicial (Tabela 2). O processo de torrefação em seus diferentes níveis foi capaz de estabilizar a umidade de equilíbrio no patamar final de 300°C em 10,47%  $\pm$  0,18; 6,00  $\pm$  0,10 e 6,25%  $\pm$  0,25, resultados satisfatórios, pois se estabilizaram abaixo do teor de umidade da biomassa original. Observa-se também a influencia do tempo na redução da umidade de equilíbrio dessas amostras, as partículas submetidas ao processo durante 1,5 h expressaram redução de até 60%. Na Figura 7 nota-se que as diferentes combinações de tratamentos influenciam a redução da umidade de equilíbrio conforme a biomassa é submetida temperaturas mais elevadas durante tempos maiores.



**FIGURA 7 - INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA REDUÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.**

Segundo Homan et al., (2000) o tratamento térmico provoca alterações nos polissacarídeos das células da madeira e age principalmente nos grupos hidroxilas (OH) presentes na celulose e hemiceluloses, a torrefação, por sua vez, degrada com facilidade as hemiceluloses, conferindo à biomassa um aspecto de baixa higroscopicidade. A redução nos teores de hemiceluloses desfavorece a capacidade da madeira em absorver a umidade do ambiente. Transformações como essa são responsáveis por estabilizar a umidade de equilíbrio em torno de 3-5%. Do ponto de vista energético, o baixo do teor de umidade garante melhor desempenho em relação à energia térmica disponível, já que existe um menor gasto energético para a evaporação da água no processo de queima do resíduo. Além disso, a biomassa tratada termicamente permite o armazenamento do combustível por períodos mais longos, uma vez que fungos xilófagos não atacam biomassa com baixo teor de umidade.

Com os dados obtidos foi proposto um modelo de regressão quadrático para o ajuste dos dados de Rendimento Gravimétrico e Umidade de Equilíbrio das amostras em função do tempo e temperatura de tratamento. Como a redução no rendimento gravimétrico é consequência da degradação térmica das amostras,

que se acentua em maiores temperaturas e tempos de tratamento, o modelo proposto apresenta o termo temperatura ao quadrado e a interação entre tempo e temperatura (parcela com os fatores Temperatura x Tempo), sendo expresso pela seguinte equação ajustada:

$$\mathbf{Rg(\%) = 0,710 \times Temperatura - 0,0015 \times Temperatura^2 + 0,303 \times Tempo - 0,00152 \times Temperatura \times Tempo}$$

O modelo apresenta um ótimo ajuste aos dados de rendimento gravimétrico, com coeficiente de determinação de 0,997 e erro padrão relativo da estimativa (coeficiente de variação) de 5,65%, propiciando interpolações para valores não medidos nas faixas de temperatura de 200 à 300°C e tempo de 30 a 90 minutos.

Adicionalmente, a fração de hemiceluloses, por serem menos estáveis termicamente, é a mais afetada no processo de torrefação; e, sendo este polissacarídeo altamente hidrofílico, sua redução promove uma perda desejável da hidrofiliabilidade do resíduo, o que acarreta uma menor umidade de equilíbrio nas amostras tratadas. O modelo proposto para a estimativa da umidade de equilíbrio em função da temperatura e tempo de tratamento é expresso pela seguinte equação:

$$\mathbf{U_{eq} (\%) = 0,743 \times Temperatura - 0,0014 \times Temperatura^2 + 0,179 \times Tempo - 0,000998 \times Temperatura \times Tempo - 80,429}$$

O modelo apresenta ajuste satisfatório aos dados, com coeficiente de determinação de 0,629 e erro padrão relativo da estimativa (coeficiente de variação) de 17,79 %, propiciando interpolações para valores não medidos nas faixas de temperatura de 200 à 300°C e tempo de 30 a 90 minutos.

## **5.2 Análise Imediata e poder calorífico**

Como esperado, o tratamento térmico afetou a composição química imediata da biomassa. Com o aumento da temperatura de patamar final e

variação do tempo observa-se um aumento significativo de até 28% no teor de carbono fixo, consequentemente diminuição no teor de materiais voláteis em 25% e tendência de aumento no teor de cinza das amostras. Na Tabela 5, observa-se que o aumento das concentrações foram mais intensas, na medida em que ocorre o aumento da temperatura e tempo, refletindo diretamente no aumento da quantidade de energia disponível, comprovado pelo aumento gradual do Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg).

**TABELA 5** - INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA; COM PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) ESTIMADO A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA (AI) E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DETERMINADO POR BOMBA CALORIMÉTRICA (BC).

ANÁLISE IMEDIATA			PODER CALORÍFICO (Kcal/Kg)		
	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)	PCS (A.I.)	PCS (BC)
<b>Testemunha</b>	75,44 ± 0,97 cde	24,02 ± 0,97 d	0,53 ± 0,02 de	4842 ± 46 b	4688
<b>Tratamentos</b>					
<b>0,5 h 200°C</b>	79,37 ± 1,94 b	19,75 ± 1,94 e	0,87 ± 0,35 cde	4629 ± 52 c	4710
<b>0,5 h 220°C</b>	75,60 ± 1,51 bcd	24,04 ± 1,51 d	0,36 ± 0,01 e	4849 ± 71 b	4701
<b>0,5 h 240°C</b>	76,13 ± 1,42 bc	23,42 ± 1,42 de	0,44 ± 0,02 de	4817 ± 67 b	4591
<b>0,5 h 260°C</b>	74,79 ± 0,93 cde	24,76 ± 0,93 cd	0,44 ± 0,05 de	4881 ± 44 b	4579
<b>0,5 h 280°C</b>	73,66 ± 0,99 cdef	25,78 ± 0,99 cd	0,56 ± 0,07 de	4924 ± 47 ab	4581
<b>0,5 h 300°C</b>	71,66 ± 0,87 ef	26,8 ± 0,87 cd	1,53 ± 1,55 cde	4938 ± 41 ab	4948
<b>1,0 h 200°C</b>	75,69 ± 1,48 bcd	23,84 ± 1,48 d	0,47 ± 0,03 de	4836 ± 70 b	4868
<b>1,0 h 220°C</b>	84,15 ± 0,31 a	15,32 ± 0,31 f	0,52 ± 0,01 de	4431 ± 14 d	4783
<b>1,0 h 240°C</b>	76,05 ± 0,38 bc	23,45 ± 0,38 de	0,49 ± 0,002 de	4817 ± 18 b	4720
<b>1,0 h 260°C</b>	72,61 ± 1,28 cdef	26,22 ± 1,28 cd	1,17 ± 1,14 cde	4924 ± 61 ab	4866
<b>1,0 h 280°C</b>	72,16 ± 1,30 def	26,8 ± 1,30 cd	1,04 ± 0,47 cde	4956 ± 62 ab	4922
<b>1,0 h 300°C</b>	64,62 ± 1,17 h	31,66 ± 1,17 ab	3,71 ± 2,71 bc	5091 ± 55 a	5313
<b>1,5 h 200°C</b>	75,17 ± 1,40 cde	24,37 ± 1,40 d	0,46 ± 0,02 de	4861 ± 66 b	4806
<b>1,5 h 220°C</b>	74,11 ± 1,63 cde	25,41 ± 1,63 cd	0,48 ± 0,05 de	4910 ± 77 b	4788
<b>1,5 h 240°C</b>	72,40 ± 1,58 cdef	27,08 ± 1,58 cd	0,51 ± 0,02 de	4988 ± 75 ab	4913
<b>1,5 h 260°C</b>	70,19 ± 1,10 fg	26,50 ± 1,10 cd	3,30 ± 0,97 bcd	4862 ± 52 b	4967
<b>1,5 h 280°C</b>	67,51 ± 1,75 gh	28,21 ± 1,75 bc	4,27 ± 0,45 b	4908 ± 83 b	5172
<b>1,5 h 300°C</b>	56,57 ± 1,02 i	33,62 ± 1,02 a	9,80 ± 2,11 a	4968 ± 48 ab	5580

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para comparação de médias.

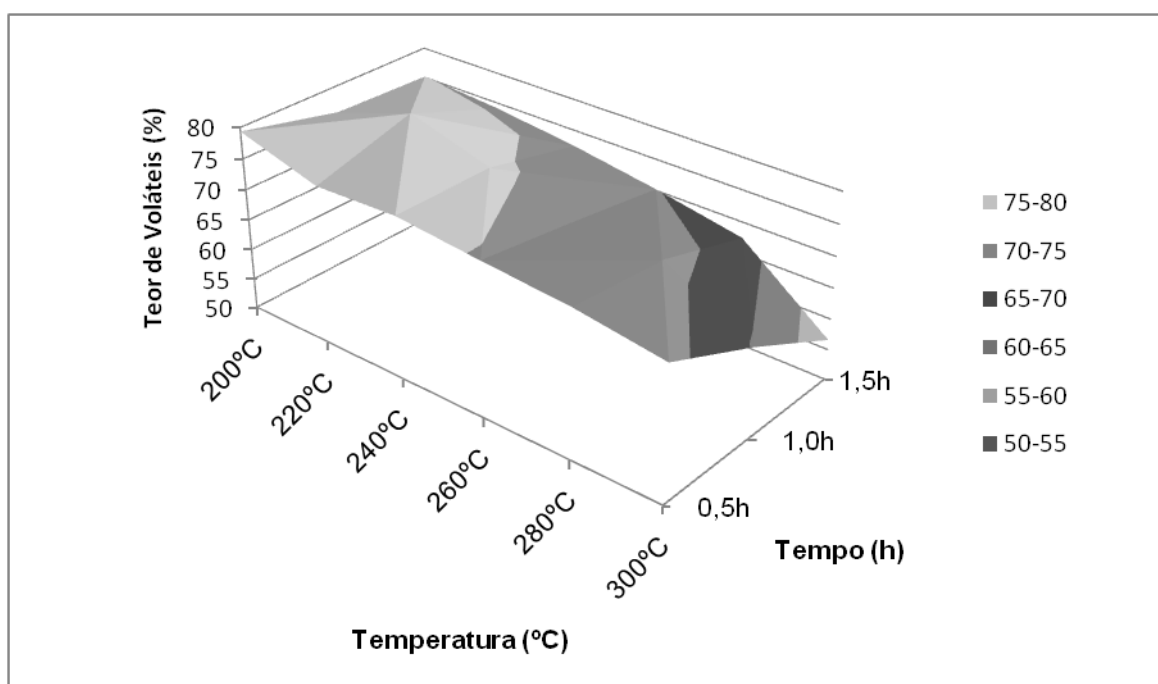
Os dados da Tabela 6 demonstram que a interação da temperatura e tempo de tratamento promove a liberação de maiores quantidades de voláteis provenientes da degradação principalmente dos polissacarídeos, reduzindo assim o teor de materiais voláteis nas amostras tratadas em maiores tempos e temperaturas. O restante do material que não foi volatilizado fica retido na forma de carbono fixo e cinza do combustível, acarretando acréscimo no teor de cinzas; o carbono fixo por sua vez é dependente dos valores de teor de voláteis e cinzas.

A redução no teor de voláteis, ocasionou elevação do teor de cinzas que consequentemente acarretou a concentração de carbono fixo, que por sua vez aumentou proporcionalmente o poder calorífico. Observa-se na Tabela 6 que a interação dos fatores levou a redução de até 25% na quantidade de materiais voláteis, o que gera uma menor quantidade de fumaça emitida durante a queima do combustível. A Figura 8 ilustra a interação entre os fatores, nota-se que a redução do teor de voláteis se dá quando submete-se a biomassa a temperaturas maiores durante 1,0 h e 1,5 h.

**TABELA 6** - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NA REDUÇÃO DOS TEORES DE MATERIAIS VOLÁTEIS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA.

Tratamentos	TEOR DE VOLÁTEIS (%)					
	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
<b>0,5 h</b>	79,37 aA	75,60 bB	76,13 aB	74,79 aB	73,66 aBC	71,66 aC
<b>1,0 h</b>	75,69 bB	84,15 aA	76,05 aB	72,61 abC	72,16 aC	64,62 bD
<b>1,5 h</b>	75,17 bA	74,10 bA	72,40 bAB	70,19 bBC	67,51 bC	56,57 cD

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade. Existe interação entre os fatores a nível de 1% e probabilidade. Linhas: letras minúsculas; Colunas: letras maiúsculas.



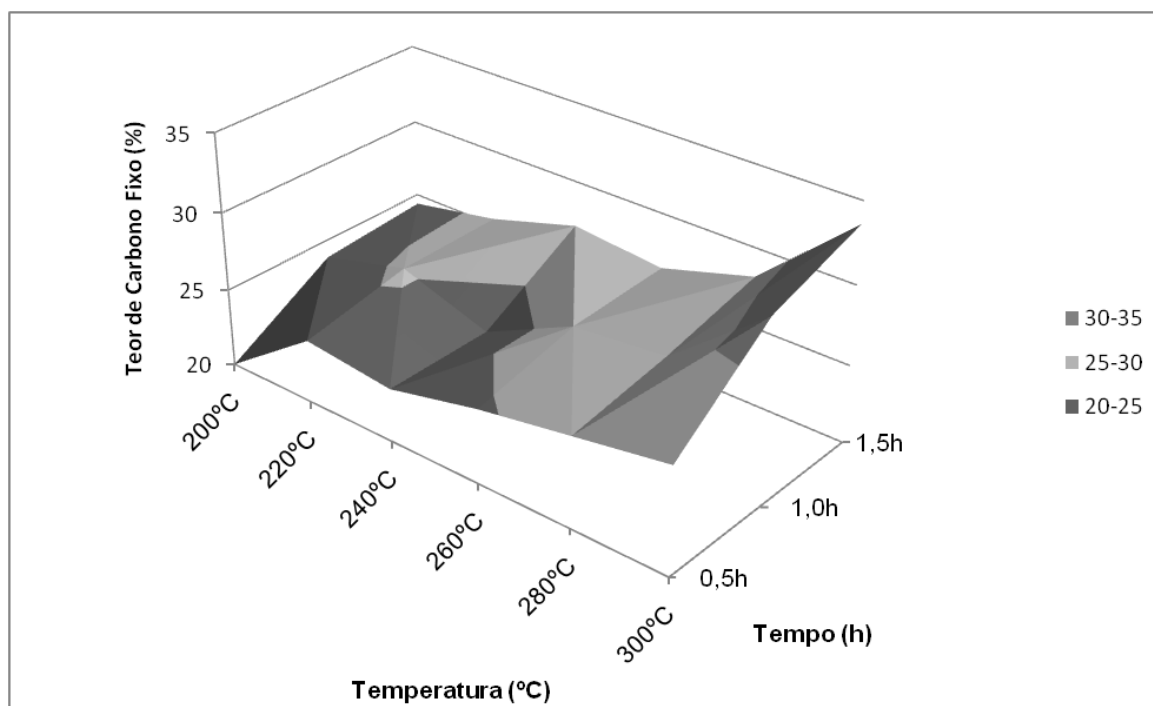
**FIGURA 8** - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA NA REDUÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAIS VOLÁTEIS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA.

Em termos gerais, o tratamento de torrefação ocasionou o aumento da concentração de carbono fixo, os valores estão descritos na Tabela 7. A interação entre os fatores temperatura e tempo favoreceram a diminuição do teor de voláteis, que foi o maior responsável pelo acréscimo de 28% na concentração de carbono fixo. Antal Junior et al., (2003), relatam que o carbono que fica retido na biomassa é responsável pelo adensamento energético. Na Figura 9 observa-se que o aumento da concentração do teor de carbono fixo se dá em temperatura mais elevadas e em regiões onde o tratamento dura entre 1,0h e 1,5h.

**Tabela 7** - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NO AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE CARBONO FIXO DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA.

Tratamentos	TEOR DE CARBONO FIXO (%)					
	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
<b>0,5 h</b>	19,75 bC	24,05 aAB	23,43 bB	24,77 aAB	25,78 aAB	26,80 bA
<b>1,0 h</b>	23,84 aBC	15,32 bD	23,45 bC	26,23 aBC	26,8 aB	31,66 aA
<b>1,5 h</b>	24,37 aC	25,42 aBC	27,08 aBC	26,50 aBC	28,21 aB	33,63 aA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Existe interação entre os fatores ao nível de 1% e probabilidade. Linhas: letras minúsculas; Colunas: letras maiúsculas.



**FIGURA 9 - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CARBONO FIXO DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA.**

Os valores do teor de cinza das amostras tratadas termicamente estão descritos na Tabela 8, em termos relativos, o processo de torrefação aumentou gradativamente o teor de cinzas nos tratamentos mais severos. A interação dos fatores temperatura e tempo foram expressivos de forma abrupta em temperaturas superiores à 260°C com duração de tratamento de 1,0 e 1,5h, que resultaram no teor de cinzas > 1%. Segundo McKendry (2002) a energia disponível no combustível reduz em proporção ao teor de cinzas. Por outro lado, os resíduos torrados em temperaturas inferiores à 240°C não sofreram tal alteração no teor de cinzas, quando comparadas à amostra testemunha sem tratamento (Tabela 5); ou seja, o tratamento térmico em temperaturas menores, não altera o teor de cinzas. Do ponto de vista energético, é desejável um combustível com baixo teor de cinzas e com o mínimo de impurezas possível que facilite o uso do material como combustível.

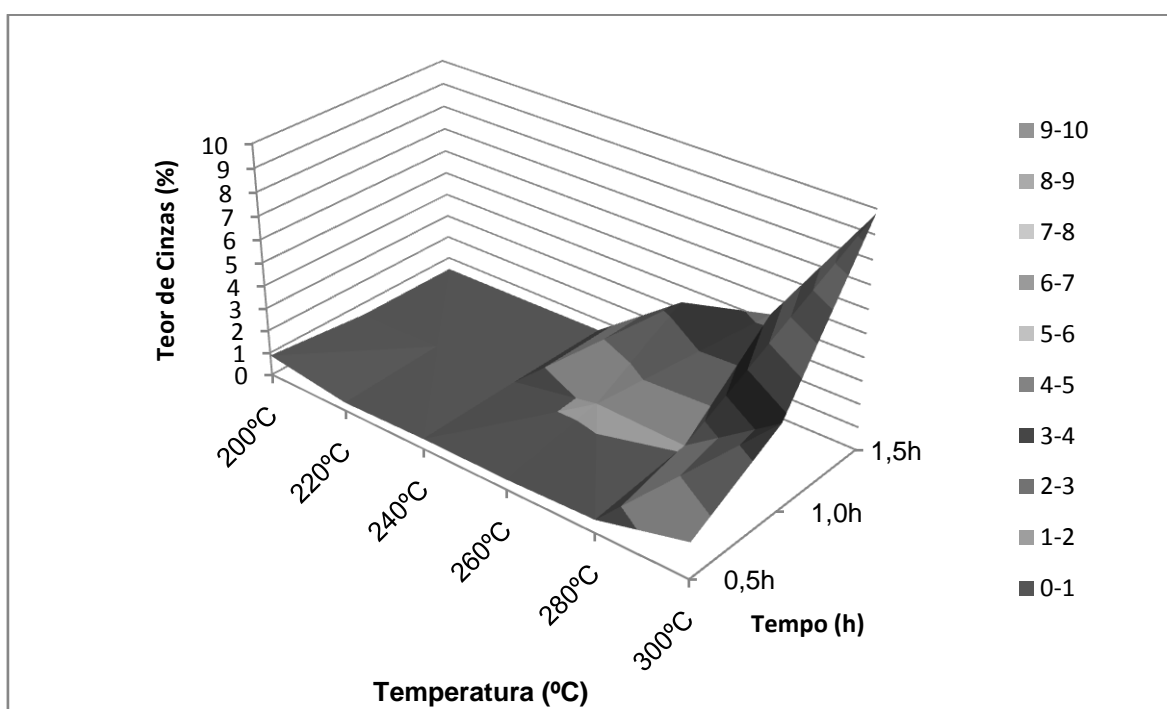


**TABELA 8** - INFLUÊNCIA DA INTERAÇÃO TEMPO X TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA RESIDUAL TORRADA.

Tratamentos	TEOR DE CINZAS (%)					
	200°C	220°C	240°C	260°C	280°C	300°C
<b>0,5 h</b>	0,87 aA	0,36 aA	0,44 aA	0,44 bA	0,56 bA	1,53 cA
<b>1,0 h</b>	0,47 aB	0,52 aB	0,49 aB	1,17 bB	1,04 bB	3,71 bA
<b>1,5 h</b>	0,46 aC	0,48 aC	0,51 aC	3,30 aB	4,27 aB	9,80 aA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Existe interação entre os fatores ao nível de 1% e probabilidade. Linhas: letras minúsculas; Colunas: letras maiúsculas.

Observa-se pela Tabela 8 o aumento na concentração do teor de cinzas, conforme as amostras são tratadas em temperaturas mais severas, a partir de 1,0h de tratamento, mantendo-se estáveis em temperaturas suaves. A Figura 10 ilustra o comportamento das amostras.



**FIGURA 10** – INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NO AUMENTO DO TEOR DE CINZAS DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.

Macedo et al., (2014), realizou o processo de torrefação em cinco tipos de resíduos lignocelulósicos, sendo, casca de arroz; bagaço de cana; casca de

pinhão manso; capim elefante e bambu. O tratamento térmico foi conduzido em reator de torrefação tubular aquecido por resistência elétrica, as amostras foram submetidas ao tratamento durante 15 min à 250°C, que gerou variação na composição das biomassas. Os teores de cinza variam de 2,1 a 26,4%, e os de voláteis de 55,9 a 78,3% respectivamente para casca de arroz e bambu. Os teores de carbono fixo variam de 13,9% para bagaço de cana e 21,3%, para a casca de pinhão manso. Os dados encontrados na literatura são compatíveis com os dados encontrados para a biomassa residual de Candeia tratada termicamente.

### **5.3. Análise elementar, gases de combustão e poder calorífico**

Na Tabela 9 observa-se os resultados da análise elementar, no qual foi possível perceber que o aumento da temperatura de torrefação ocasionou o aumento do teor de carbono em 20%, redução de 25% no teor de oxigênio e redução 12% na quantidade de hidrogênio disponível. Nota-se a influência do tempo nos resultados da análise elementar, no qual a tendência de redução é maior conforme o tempo de tratamento é aumentado. Para O% o tratamento térmico reduz até 9% quando submete-se a amostra ao tratamento durante 0,5h; 18% quando submete-se a amostra ao tratamento durante 1,0h e 25% de redução a 1,5h. Para H% o processo térmico reduz 12% quando as amostras são tratadas durante 1,5h; em tempos menores a redução no teor de hidrogênio é menor.

O poder calorífico (Tabela 9) ajustado pela composição química elementar apresenta comportamento ascendente, os aumentos nas concentrações elementares refletiram na estimativa do poder calorífico superior. Em relação ao valor real de poder calorífico determinado pela bomba calorimétrica para amostra testemunha, a estimativa do poder calorífico pela composição elementar é cerca de 8% superior.

**TABELA 9** - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DA BIOMASSA *IN NATURA* E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS COM O PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS) DETERMINADO POR BOMBA CALORIMÉTRICA (BC) E ESTIMADO POR EQUAÇÃO DE REGRESSÃO AJUSTADA POR MEIO DE DADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR (AE).

		ANÁLISE ELEMENTAR					PODER CALORÍFICO (Kcal/Kg)	
		N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O* (%)	PCS (AE)	PCS (BC)
<b>Testemunha</b>		0,22	47,72	7,76	0,080	44	5046	4688
<b>Tratamentos</b>								
<b>0,5 h</b>	<b>200°C</b>	0,22	48,33	7,73	0,050	44	5081	4710
<b>0,5 h</b>	<b>220°C</b>	0,19	48,49	7,83	0,021	43	5156	4701
<b>0,5 h</b>	<b>240°C</b>	0,17	48,51	7,75	0,016	44	5127	4591
<b>0,5 h</b>	<b>260°C</b>	0,20	49,13	7,73	0,012	43	5190	4579
<b>0,5 h</b>	<b>280°C</b>	0,20	49,32	7,74	0,016	43	5207	4581
<b>0,5 h</b>	<b>300°C</b>	0,23	52,17	7,41	0,012	40	5355	4948
<b>1,0 h</b>	<b>200°C</b>	0,25	49,15	7,74	0,048	43	5197	4868
<b>1,0 h</b>	<b>220°C</b>	0,22	49,49	7,69	0,023	43	5212	4783
<b>1,0 h</b>	<b>240°C</b>	0,23	49,51	7,70	0,020	43	5218	4720
<b>1,0 h</b>	<b>260°C</b>	0,19	50,63	7,57	0,019	42	5259	4866
<b>1,0 h</b>	<b>280°C</b>	0,24	51,64	7,57	0,016	41	5377	4922
<b>1,0 h</b>	<b>300°C</b>	0,27	56,28	7,13	0,013	36	5571	5313
<b>1,5 h</b>	<b>200°C</b>	0,20	49,55	7,58	0,031	43	5191	4806
<b>1,5 h</b>	<b>220°C</b>	0,19	50,05	7,58	0,018	42	5240	4788
<b>1,5 h</b>	<b>240°C</b>	0,22	51,61	7,43	0,017	41	5362	4913
<b>1,5 h</b>	<b>260°C</b>	0,20	52,61	7,35	0,011	40	5278	4967
<b>1,5 h</b>	<b>280°C</b>	0,22	54,15	7,29	0,012	38	5362	5172
<b>1,5 h</b>	<b>300°C</b>	0,28	59,81	6,82	0,011	33	5445	5580

\*Valores obtidos por diferença

Na torrefação de biomassa, se perde relativamente mais oxigênio e hidrogênio, em relação ao carbono, sendo que os altos conteúdos de carbono e hidrogênio refletem em poder calorífico mais elevado. O processo de torrefação possibilitou o adensamento na quantidade de carbono elementar refletindo diretamente na quantidade de energia disponível, verifica-se tal fato, pelo

comportamento do poder calorífico superior (Kcal/Kg) estimado pela análise elementar.

Segundo Rendeiro et al., (2008) a partir da composição elementar é possível quantificar a relação ar-combustível na queima do resíduo bem como prever a composição de gases que serão gerado no processo de combustão completa. No processo de queima completa, os elementos do combustível são transformados em dióxido de carbono (queima do carbono) e água (queima do hidrogênio) com geração de calor. Quando a combustão não é completa, o processo incompleto resulta na formação de monóxido de carbono, compostos orgânicos e menor quantidade de calor (LOPES et al., 2002). As estimativas da emissão de gases poluentes  $\text{CO}_2$  e  $\text{SO}_2$ , gerados a partir do balanceamento das equações de combustão completa (Anexo I), estão representadas na Tabela 10.

**TABELA 10** - GASES FORMADOS NA COMBUSTÃO COMPLETA DE RESÍDUO DE CANDEIA, A PARTIR DE SUA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR.

<b>EMIÇÃO DE GASES POLUENTES</b>					
		<b>C (%)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (Nm<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>S (%)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (Nm<sup>3</sup>/kg)</b>
<b>Testemunha</b>		47,72	0,7481	0,080	4,70E-04
<b>Tratamentos</b>					
<b>0,5h</b>	<b>200°C</b>	48,33	0,8147	0,050	3,16E-04
<b>0,5h</b>	<b>220°C</b>	48,49	0,7710	0,021	1,25E-04
<b>0,5h</b>	<b>240°C</b>	48,51	0,7779	0,016	9,62E-05
<b>0,5h</b>	<b>260°C</b>	49,13	0,7710	0,012	7,06E-05
<b>0,5h</b>	<b>280°C</b>	49,32	0,7569	0,016	9,21E-05
<b>0,5h</b>	<b>300°C</b>	52,17	0,8590	0,012	7,41E-05
<b>1,0h</b>	<b>200°C</b>	49,15	0,8068	0,048	2,95E-04
<b>1,0h</b>	<b>220°C</b>	49,49	0,7843	0,023	1,37E-04
<b>1,0h</b>	<b>240°C</b>	49,51	0,8058	0,020	1,22E-04
<b>1,0h</b>	<b>260°C</b>	50,63	0,8306	0,019	1,17E-04
<b>1,0h</b>	<b>280°C</b>	51,64	0,8449	0,016	9,82E-05
<b>1,0h</b>	<b>300°C</b>	56,28	0,9514	0,013	8,24E-05
<b>1,5h</b>	<b>200°C</b>	49,55	0,8264	0,031	1,94E-04
<b>1,5h</b>	<b>220°C</b>	50,05	0,8281	0,018	1,12E-04
<b>1,5h</b>	<b>240°C</b>	51,61	0,8734	0,017	1,08E-04
<b>1,5h</b>	<b>260°C</b>	52,61	0,8626	0,011	6,76E-05
<b>1,5h</b>	<b>280°C</b>	54,15	0,8753	0,012	7,27E-05
<b>1,5h</b>	<b>300°C</b>	59,81	0,9446	0,011	6,51E-05

O maior teor de carbono e menor de enxofre em amostras tratadas, em tempos e temperaturas maiores, propiciaram uma maior quantidade de gás CO<sub>2</sub> e menor de gás SO<sub>2</sub>, conforme consta na Tabela 9. Observa-se que o processo de torrefação influência na redução de 86% na emissão de gases de dióxido de enxofre, todavia, acréscimo de 21% na emissão de gases de dióxido de carbono, isso se justifica pelo aumento da concentração no teor de carbono e redução na de enxofre acarretada pela ação do calor sob a biomassa.

#### 5.4. Poder calorífico Superior

A análise do Poder Calorífico Superior (PCS) buscou avaliar o parâmetro em condições ideais para uso, ou seja, supondo queima completa do resíduo. Os valores de Poder Calorífico estimados pela equação de regressão proposta Parikh et al.,(2005) que se baseia em dados de análise imediata, os valores estimados pela composição elementar e os valores determinados pela bomba calorimétrica, encontram-se descritos na Tabela 11. Com os resultados encontrados para torrefação verifica-se que o tratamento melhorou as propriedades energéticas, comparando-os aos resíduos da biomassa *in natura*. De modo geral houve tendência no aumento do poder calorífico conforme a elevação da temperatura e tempo de tratamento que a biomassa foi submetida. Os resultados estatísticos constataam que há diferença entre os tratamentos.

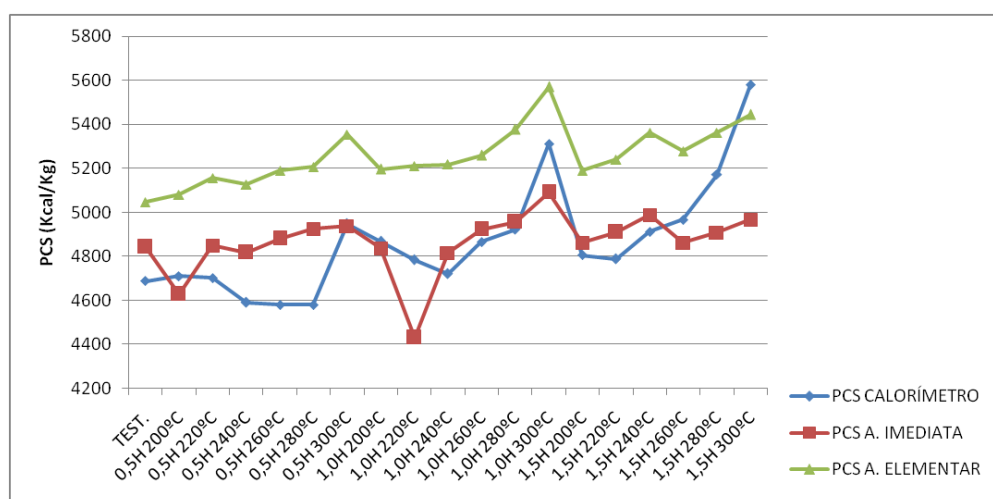
**TABELA 11-** PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA *IN NATURA* E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDAS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO (PCS BC), DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO CONSIDERANDO A ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA.

		PCS BC (Kcal/kg)	PCS IMEDIATA (Kcal/kg)	PCS ELEMENTAR (Kcal/kg)
Testemunha		4688	4842± 46 b	5046
200°C	0,5 h	4710	4629± 52 c	5081
220°C	0,5 h	4701	4849 ± 71 b	5156
240°C	0,5 h	4591	4817 ± 67 b	5127
260°C	0,5 h	4579	4881 ± 44 b	5190
280°C	0,5 h	4581	4924 ± 47 ab	5207
300°C	0,5 h	4948	4938 ± 41 ab	5355
200°C	1,0 h	4868	4836 ± 70 b	5197
220°C	1,0 h	4783	4431 ± 14 d	5212
240°C	1,0 h	4720	4817 ± 18 b	5218
260°C	1,0 h	4866	4924 ± 61 ab	5259
280°C	1,0 h	4922	4956 ± 62 ab	5377
300°C	1,0 h	5313	5091 ± 55 a	5571
200°C	1,5 h	4806	4861 ± 66 b	5191
220°C	1,5 h	4788	4910 ± 77 b	5240
240°C	1,5 h	4913	4988 ± 75 ab	5362
260°C	1,5 h	4967	4862 ± 52 b	5278
280°C	1,5 h	5172	4908 ± 83 b	5362
300°C	1,5 h	5580	4968 ± 48 ab	5445

Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

.Observou-se a menor média de poder calorífico, determinado pela análise imediata, para a amostra submetida ao tratamento de 220°C durante 1,0h (4431 Kcal/kg) quando comparada ao valor da biomassa sem tratamento térmico (Tabela 11). A mesma amostra apresenta alto teor de materiais voláteis, consequentemente, baixo teor de carbono fixo, o que reflete no seu menor poder calorífico superior. O processo de torrefação realizado durante 0,5h não surtiu efeito satisfatório, uma vez que o poder calorífico determinado pela bomba calorimetria apresentou as menores médias para as amostras tratadas durante 0,5h nas temperaturas de 240°C, 260°C e 280°C, respectivamente, 4591 kcal/kg, 4579 kcal/kg e 4581 kcal/kg, quando comparado ao valor 4688 kcal/kg da amostra sem tratamento (Tabela 11).

As amostras que apresentaram maiores ganhos energéticos foram tratadas termicamente em temperaturas superiores a 260°C, incrementando até 25% na quantidade de energia disponível na biomassa, no patamar de 300°C. O processo de torrefação se mostra eficiente quando dura 1,0h ou 1,5h em temperaturas superiores à 260°C. Fato observado pelo comportamento ascendente dos dados analisados, destaca-se os valores das amostras tratadas à 280°C durante 1,5h; 300°C durante 1,0h; 300°C durante 1,5h, respectivamente, 5172 Kcal/kg, 5313 Kcal/kg, 5580 Kcal/kg. A figura 11 ilustra o comportamento das amostras.



**FIGURA 11**-PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA IN NATURA E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE CALORÍMETRO, DE ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA.

No gráfico acima percebe-se o comportamento ascendente do poder calorífico, no qual, a tendência torna-se maior quando trata-se a biomassa por 1,0 a 1,5h em temperaturas próximas ao patamar final de tratamento. O início do pico se dá a partir de 1,5h em 260°C com poder calorífico superior na ordem de 5.000 Kcal/kg, cerca de 10% a mais na quantidade de energia disponível em relação a amostra testemunha.

### 5.5. Poder Calorífico Útil

O tratamento térmico de torrefação garantiu a estabilização da umidade de equilíbrio, que por sua vez garantiu uma maior quantidade de energia disponível na biomassa, os valores de poder calorífico útil estão descritos na Tabela 12.



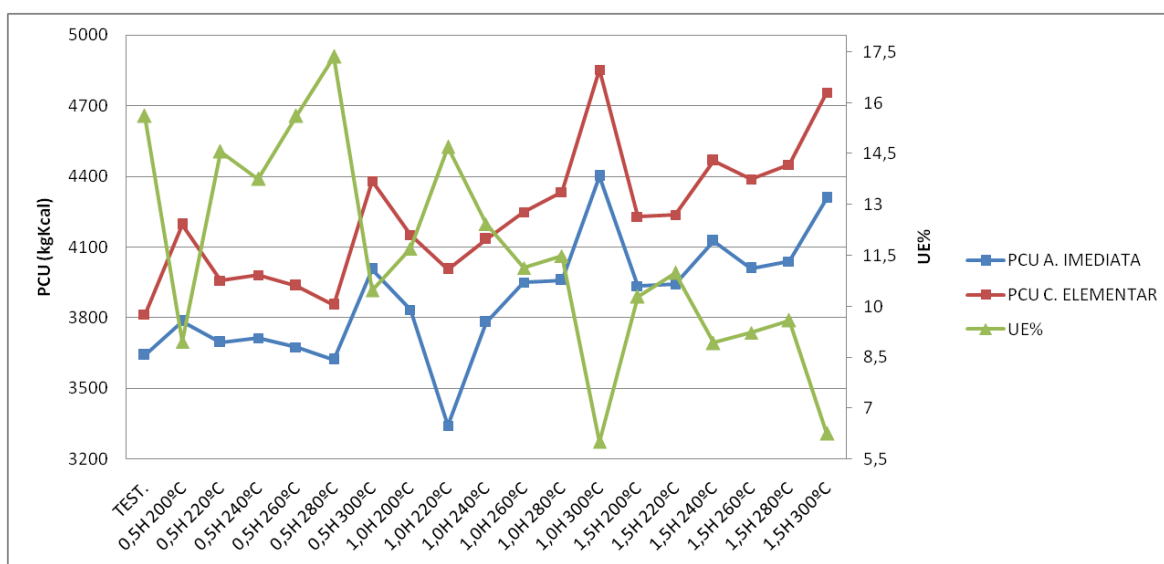
Genericamente, o tratamento térmico aumentou o poder calorífico útil da biomassa influenciado pela redução na umidade de equilíbrio, constata-se o aumento pela estimativa dos valores a partir da composição imediata e composição elementar.

**TABELA 12** - PODER CALORÍFICO ÚTIL DA BIOMASSA *IN NATURA* E DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AOS TRATAMENTOS TÉRMICOS, OBTIDO A PARTIR DE ANÁLISE IMEDIATA E DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA.

		PCU ANÁLISE IMEDIATA (Kcal/Kg)	PCU COMPOSIÇÃO ELEMENTAR (Kcal/Kg)	UE%	H (%)
Testemunha		3640 ± 46	3813	15,62	7,76
200°C	0,5h	3784 ± 52	4196	8,95	7,73
220°C	0,5h	3696 ± 61	3958	14,56	7,83
240°C	0,5h	3712 ± 58	3980	13,76	7,75
260°C	0,5h	3674 ± 37	3936	15,61	7,73
280°C	0,5h	3621 ± 39	3855	17,37	7,74
300°C	0,5h	4005 ± 37	4379	10,47	7,41
200°C	1,0h	3833 ± 62	4151	11,7	7,74
220°C	1,0h	3340 ± 12	4005	14,7	7,69
240°C	1,0h	3781 ± 16	4133	12,43	7,70
260°C	1,0h	3950 ± 54	4248	11,13	7,57
280°C	1,0h	3960 ± 54	4332	11,48	7,57
300°C	1,0h	4401 ± 52	4852	6	7,13
200°C	1,5h	3934 ± 60	4229	10,29	7,58
220°C	1,5h	3942 ± 69	4236	10,99	7,58
240°C	1,5h	4125 ± 68	4467	8,92	7,43
260°C	1,5h	4009 ± 47	4388	9,22	7,35
280°C	1,5h	4038 ± 75	4449	9,59	7,29
300°C	1,5h	4308 ± 45	4756	6,25	6,82

U.E%: umidade de equilíbrio; H(%): composição elementar – teor de hidrogênio.

Os valores de poder calorífico útil estimado pela composição elementar expressam valores acima dos valores estimados pela equação de regressão que utiliza os dados da composição química imediata. Nota-se a influencia da umidade de equilíbrio no poder calorífico útil, as amostras que apresentam umidade de equilíbrio menor detêm os maiores valores de poder calorífico. Na Figura 12 nota-se a influência da umidade de equilíbrio na energia disponível do combustível.



**FIGURA 12** - PODER CALORÍFICO ÚTIL E UMIDADE DE EQUILÍBRIO DOS RESÍDUOS DE CANDEIA SUBMETIDOS AO PROCESSO DE TORREFAÇÃO.

No gráfico acima nota-se o que a torrefação é eficaz quando trata-se a biomassa em temperaturas próximas ao patamar final de tratamento, pelo menos durante 1,0h ou 1,5h. O comportamento é ascendente, e de acordo com o comportamento demonstrado a tendência do aumento do poder calorífico útil varia em função da faixa de temperatura torrefação escolhida.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados do presente estudo, conclui-se que a torrefação é um tratamento térmico que afeta os resíduos de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) de acordo com a combinação de tempo e temperatura final de patamar, influenciando de forma satisfatória as características energéticas finais. O processo térmico mostrou-se mais eficiente quando se submete as partículas a temperaturas próximas ao patamar final de tratamento (260°C; 280°C; 300°C), por pelo menos 1,0h ou 1,5h.

Em relação ao rendimento gravimétrico, temperaturas mais altas e tempos maiores refletem em rendimentos gravimétricos menores. A ação do tempo e da temperatura reduz em até 40% a quantidade de massa do resíduo após a torrefação, o que resulta na menor quantidade de partículas de Candeia estocadas ao ar livre. O processo de torrefação nas amostras mostrou-se eficaz, uma vez que, o tratamento térmico reduziu em 62% o teor de umidade de equilíbrio, estabilizando em 6%. O processo de torrefação evita a interatividade da biomassa com a umidade do ambiente, reduzindo assim a hidrofilicidade da amostra tratada termicamente.

Em relação à composição química imediata das amostras, o tratamento térmico acarretou importantes diminuições e aumentos, ambos significativos. Para o teor de carbono fixo houve incremento de 28%, de acordo com o tempo de tratamento e da elevação da temperatura de residência, assim como para o teor de cinzas, que seguiu comportamento ascendente. Já o teor de materiais voláteis sofreu redução de até 25% nas temperaturas mais elevadas, correspondendo em uma menor quantidade de fumaça emitida durante a queima do combustível.

Em relação à composição elementar das amostras, constatou-se a influência da temperatura de torrefação no incremento do teor de carbono (20%) e redução das concentrações de hidrogênio (12%) e oxigênio (25%). As concentrações, tanto para hidrogênio e oxigênio, foram afetadas pelo tempo de tratamento, na qual a tendência de redução é maior para amostras submetidas ao tratamento térmico por mais tempo. O incremento de carbono é proporcional ao tratamento que a amostra foi submetida. Os tratamentos térmicos induziram a redução das emissões de SO<sub>2</sub> (86%), todavia, houve acréscimo de 21% na

emissão de CO<sub>2</sub> devido ao aumento do teor de carbono, quando comparadas a amostra testemunha.

Em relação ao poder calorífico, o processo de torrefação do resíduo de Candeia mostrou-se eficiente, uma vez que, houve acúmulo de energia nas amostras. O tratamento térmico trouxe aumento gradual de até 20% no poder calorífico superior de acordo com a combinação de tempo de residência e temperatura de tratamento. A torrefação acarretou influência sobre o poder calorífico útil, uma vez que a biomassa tratada apresenta redução na umidade de equilíbrio, por consequência maior quantidade de energia disponível nas amostras. A equação de regressão proposta por Parikh et al.,(2005) mostrou-se melhor ajustada quando comparada ao valor real determinado por bomba calorimétrica, apresentando menor erro relativo, quando comparado ao poder calorífico superior estimado pela composição elementar.

A torrefação se mostra como um processo térmico alternativo já que as partículas de Candeia sofreram alterações interessantes para aplicação da biomassa como fonte de energia em sistemas fechados. O processo térmico, em termos gerais, estabilizou a umidade de equilíbrio das partículas, reduziu a quantidade de resíduo gerado e aumentou a disponibilidade de energia térmica, pelo aumento do poder calorífico. O material particulado respondeu de forma satisfatória ao processo de torrefação, e pode ser reintegrado ao sistema de extração na forma de combustível modificado termicamente para fornecer energia à caldeira de vapor. O resíduo lignocelulósico resultante do processo de extração de óleo essencial é um resíduo limpo, de fácil manipulação e passível de ser beneficiado para utilização posterior. A reutilização dos resíduos torrados como combustível no sistema de extração pode reduzir os custos de produção, já que a biomassa tratada apresenta cerca de 15% a mais de energia disponível, quando considera-se o poder calorífico útil.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros sugerem-se avaliar o comportamento da biomassa torrada em condições reais de combustão em sistemas fechados e novas análises das características da biomassa torrada, já que o processo de torrefação apresenta boas perspectivas como processo alternativo à utilização direta da madeira.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAL JUNIOR, M. J.; GRONLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial England Chemical Research**, London, v. 42, p. 1619-1640, 2003.

ARAÚJO, L. C. *Vanillosmopsis erythropappa*(DC.) Sch. Bip. e sua exploração florestal. 1994. 60f. Dissertação (Professor Catedrático) – Escola Nacional de Agricultura, Rio de Janeiro, 1994.

BORGES, M. B.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. hondurensis tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba, **Anais...**Curitiba, p.280-82, 1993.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidade e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1994. 640p.

CHEN, W. H.; KUO, P. C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicelluloses, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. **Energy**, v. 36, p. 803-811, 2011.

CITRÓLEO. **Alfabisabolol (2), ação antiinflamatória e especificações técnicas**. Disponível em: < [www.citrole.com.br](http://www.citrole.com.br)>. Acesso em: 19 jan. 2014

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

ESTEVES, B.; GRACA, J.; PEREIRA, H.; Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt Wood. **Holzforschung, Berlin**, v 62 n.3, p. 344-351, 2008.

FIGUEROA, M. J. M. **Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do Paricá**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GALDINO, A. P. P.; BRITO, J. O.; GARCIA, R.F; SCOLFORO, J.R. Estudo sobre o rendimento e qualidade do óleo de candeia (*Eremanthus* SSP) e a influência das diferentes origens comerciais da sua madeira. **Revista Bras. Pl. Med.**, Botucatu, v. 8, n.4, p.44-46, 2006.

HOMAN, W. et al., Structural and other properties of modified wood. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., 2000, Switzerland. **Anais eletrônicos...** Switzerland: CIB-W18 Meeting 33, 2000. Disponível em: <<http://oregonstate.edu/conferences/wcte2006/>>. Acesso em: 19 jan. 2014

JONES, D.; HILL, C. A. S. Wood modification – a brief overview of the technology. In: **international workshop on bonding of modified wood**, 5., 2007, Slovenia. Anais eletrônicos... Slovenia: Bled, 2007. Disponível em: <[http://www1.uni-hamburg.de/cost/e34/conference/2007Bled/Proceedings\\_Bled\\_2007.pdf](http://www1.uni-hamburg.de/cost/e34/conference/2007Bled/Proceedings_Bled_2007.pdf)> Acesso em: 19 jan. 2014

KORKUT, S.; HIZIROGLU, S. **Effect of heat treatment on mechanical properties of hazelnut wood** (*Corylus colurna* L.). Materials and Design, v.30 p.1853 – 1858, 2009.

LONGHI, P. R.; SOUZA, A. J. D.; GARCIA, R. F.; PIOVEZAN, V. R.; Estudo de casa do processo de extração do óleo essencial da madeira de candeia no sul de Minas Gerais. **Revista Floresta**, PR, v. 39, n. 3, p. 555-570, 2009.

LOPES, R. P. SILVA, J. S.; MAGALHÃES, E. A.; SILVA, J. N. (2002). **Energia no Pré-processamento de Produtos Agrícolas**. Disponível em: <<http://www.poscolheita.com.br/poscolheita/Secagem/Energia%20no%20preprocessamento.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2014

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. Pirólise e Torrefação da biomassa. In: **Biomassa para energia**. C. 10, P. 333-351, 2009.

MACEDO, L. A.; ROUSSET, P. L. A.; VALE, A. T. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis da torrefação de resíduos vegetais. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 34, n.80, p.00-00, out./dez. 2014.

McKendry, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MORI, F. A.; MENDES, L. M.; MORI, C. L. S. O.; SIQUEIRA, D.; GUERREIRO, M. C. Rendimento e composição química do óleo da madeira de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ÓLEOS ESSENCIAIS – DIAGNÓSTICOS E PERSPECTIVAS, 2003. Campinas **Anais...** Campinas, 2003. p. 25.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Efeito da termorreificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 69-76, 2011.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**. v. 84, p. 487-494, 2005.

PARYSEK, M.; ZAKRZEWSKI, R. Investigations on the chemical composition of pine wood subjected to hydrothermal modification. **Folia Forestalia Polonica**, v.

B, n. 37, p 3-7, 2006.

PEDRALLI, G. Estrutura diamétrica, vertical e análise do crescimento da “Candeia” (*Vanillosmopsis erythropappa* Schult. Bip) na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto – MG. **Revista Árvore**, v.21, n.2, p.301-306, 1997.

PEDRALLI, G.; TEIXEIRA, M. C. B.; NUNES, Y. R. Estudos sinecológicos sobre a candeia (*Vanillosmopsis erythropappa* Schult. Bip) na estação ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 301-306, 1997.

PEREIRA, A.A.S. **Nutrição e adubação de candeia**. Lavras: UFLA, 1998. 22p.

PÉREZ, J. F. M. et al., Sistema de manejo para a candeia *Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish, a opção do sistema de corte seletivo. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 257-273, jul./dez. 2004.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética**. 2011. 127 f. Tese (Doutorado em ciências – recursos florestais) – Universidade de São Paulo – ESALQ, Piracicaba, 2011.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. A.; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: Soluções energéticas para a Amazônia**. 1ª edição. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 192p.

REZENDE, M. E. Produção de carvão vegetal - importância do conhecimento fundamental. Belo Horizonte, 2006.

RODRIGUES T. O.; ROUSSET P. L. A.; Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* wood. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 446-452, out./dez. 2009.

ROUSSET, P. L. A.; DAVRIEUX, F.; MACEDO, L.; PERRE, P. Characterization of the torrefaction of beech wood using NIRS: Combined effects of temperature and duration. *Biomass and Bioenergy*, v.35, p1219-1216, 2011.

SCOLFORO, J. R. S. OLIVEIRA, A. D.; DAVIDE, A. C.; SILVA, C. P. C.; ANDRADE, I. S. CAMOLESI, J. F.; BORGES, L. F. R.; PAVAN, V. M. M. **O manejo da candeia nativa**. Lavras: Editora UFLA, 2008. 44 p.

SCOLFORO, J.R.S; OLIVEIRA, A.D.de; DAVIDE, A.C.; MELLO, J.M.de; ACERBI JUNIOR, F. W. **Manejo sustentável da candeia** (*Eremanthus erythropappus* (DC.) McLeishe *Eremanthus incanus* (Less.) Less.) **Manual completo**. Lavras. UFLA-FAEPE. 350p. 2002.

SCOLFORO, J.R.S; OLIVEIRA, A.D.de; DAVIDE, A.C.; MELLO, J.M.de; ACERBI JUNIOR, F. W. **Manejo sustentável da Candeia** (*Eremanthus erythropappus* (DC.) McLeishe *Eremanthus incanus* (Less.) Less.) 2007 (Relatório Técnico



Científico)

SEVERO, E. T. D.; TOMASELLI, I. Efeito do tratamento de vaporização em toras e madeira serrada de *Eucalyptos dunnii* sobre a flexão estática. *Revista Floresta*, v. 29, n. 3, p. 37-51, 2003.

SUNDQVIST, B. **Colour changes and acid formation wood during heating**. Sweden, Lulea University of Technology, Doctoral thesis (Divisions of wood material science), p. 154, 2004.

WIECHETECK, M. Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento De Resíduos e Subprodutos:** Sumário Executivo, revisão 00. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033501.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf)>. Acesso em: 8 jan. 2014.

YILDIZ, S., GEZER, D., YILDIZ, U. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, n. 12, p. 1762-1766, Dec. 2006

# ANEXOS

## ANEXO I

### REAÇÕES DE COMBUSTÃO COMPLETA

Testemunha	-	$3,34C + 6,52H + 2,32 O + 1,3 E-02 N + 2,1E-03 S + 0,87 H_2O + 0,45 A + 3,81 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,34 CO_2 + 3,26 H_2O + 2,1E-03 SO_2 + 0,87W + 0,45 A + 14,33 N_2$
0,5 h	200°C	$3,64 C + 6,98 H + 2,46 O + 1,4E-02 N + 1,4E-03 S + 0,50 H_2O + 0,80 A + 4,15 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,64 CO_2 + 3,49 H_2O + 1,41E-03 SO_2 + 0,50 W + 0,79 A + 15,61 N_2$
0,5 h	220°C	$3,44 C + 6,67 H + 2,31 O + 1,2E-02 N + 5,6E-04 S + 0,81 H_2O + 0,31 A + 3,95 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,44 CO_2 + 3,33 H_2O + 5,6E-04 SO_2 + 0,81 W + 0,31 A + 14,86 N_2$
0,5 h	240°C	$3,47 C + 6,65 H + 2,34 O + 1,0E-02 N + 4,3E-04 S + 0,76 H_2O + 0,38 A + 3,96 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,47 CO_2 + 3,33 H_2O + 4,3E-04 SO_2 + 0,76 W + 0,38 A + 14,91 N_2$
0,5 h	260°C	$3,44 C + 6,50 H + 2,25 O + 1,2E-02 N + 3,2E-04 S + 0,87 H_2O + 0,37 A + 3,94 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,44 CO_2 + 3,25 H_2O + 3,2E-04 SO_2 + 0,87 W + 0,37 A + 14,81 N_2$
0,5 h	280°C	$3,38 C + 6,36 H + 2,19 O + 1,2E-02 N + 4,1E-04 S + 0,97 H_2O + 0,46 A + 3,87 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,38 CO_2 + 3,18 H_2O + 4,1E-04 SO_2 + 0,97 W + 0,46 A + 14,56 N_2$
0,5 h	300°C	$3,83 C + 6,53 H + 2,21 O + 1,4E-02 N + 3,3E-04 S + 0,58 H_2O + 1,35 A + 4,36 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,83 CO_2 + 3,27 H_2O + 3,3E-04 SO_2 + 0,58 W + 1,35 A + 16,40 N_2$
1,0 h	200°C	$3,60 C + 6,81 H + 2,35 O + 1,6E-02 N + 1,3E-03 S + 0,65 H_2O + 0,41 A + 4,13 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,60 CO_2 + 3,40 H_2O + 1,3E-03 SO_2 + 0,65 W + 0,41 A + 15,52 N_2$
1,0 h	220°C	$3,50 C + 6,52 H + 2,26 O + 1,3E-02 N + 6,1E-04 S + 0,82 H_2O + 0,44 A + 4,00 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,50 CO_2 + 3,26 H_2O + 6,1E-04 SO_2 + 0,82 W + 0,44 A + 15,05 N_2$
1,0 h	240°C	$3,60 C + 6,71 H + 2,32 O + 1,4E-02 N + 5,4E-04 S + 0,69 H_2O + 0,43 A + 4,11 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,60 CO_2 + 3,35 H_2O + 5,4E-04 SO_2 + 0,69 W + 0,43 A + 15,48 N_2$
1,0 h	260°C	$3,71 C + 6,65 H + 2,28 O + 1,2E-02 N + 5,2E-04 S + 0,62 H_2O + 1,02 A + 4,23 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,71 CO_2 + 3,32 H_2O + 5,2E-04 SO_2 + 0,62 W + 1,02 A + 15,90 N_2$
1,0 h	280°C	$3,77 C + 6,63 H + 2,22 O + 1,5E-02 N + 4,4 E-04 S + 0,64 H_2O + 0,91 A + 4,32 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,77 CO_2 + 3,33 H_2O + 4,4E-04 SO_2 + 0,64 W + 0,91 A + 16,25 N_2$
1,0 h	300°C	$4,24 C + 6,45 H + 2,05 O + 1,7E-02 N + 3,7E-04 S + 0,33 H_2O + 3,36 A + 4,83 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 4,24 CO_2 + 3,25 H_2O + 3,7E-04 SO_2 + 0,33 W + 3,36 A + 18,18 N_2$
1,5 h	200°C	$3,69 C + 6,77 H + 2,38 O + 1,3E-02 N + 8,7E-04 S + 0,57 H_2O + 0,41 A + 4,19 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,69 CO_2 + 3,39 H_2O + 8,7E-04 SO_2 + 0,57 W + 0,41 A + 15,77 N_2$
1,5 h	220°C	$3,69 C + 6,71 H + 2,33 O + 1,2E-02 N + 5,0E-04 S + 0,61 H_2O + 0,42 A + 4,21 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,69 CO_2 + 3,36 H_2O + 5,0E-04 SO_2 + 0,61 W + 0,42 A + 15,82 N_2$
1,5 h	240°C	$3,90 C + 6,74 H + 2,31 O + 1,4E-02 N + 4,8E-04 S + 0,50 H_2O + 0,47 A + 4,43 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,90 CO_2 + 3,37 H_2O + 4,8E-04 SO_2 + 0,50 W + 0,47 A + 16,66 N_2$
1,5 h	260°C	$3,85 C + 6,45 H + 2,19 O + 1,3E-02 N + 3,0E-04 S + 0,51 H_2O + 2,90 A + 4,37 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 3,85 CO_2 + 3,23 H_2O + 3,0E-04 SO_2 + 0,51 W + 2,90 A + 16,44 N_2$

---

**REAÇÕES DE COMBUSTÃO COMPLETA**


---

1,5 h	280°C	$3,91 \text{ C} + 6,31 \text{ H} + 2,07 \text{ O} + 1,4\text{E-}02 \text{ N} + 3,2 \text{ E-}04 \text{ S} + 0,53 \text{ H}_2\text{O} + 3,70 \text{ A} + 4,45 (\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$ $\rightarrow 3,91 \text{ CO}_2 + 3,16 \text{ H}_2\text{O} + 3,2 \text{ E-}04 \text{ SO}_2 + 0,53 \text{ W} + 3,70 \text{ A} + 16,73 \text{ N}_2$
1,5 h	300°C	$4,21 \text{ C} + 5,76 \text{ H} + 1,75 \text{ O} + 1,7\text{E-}02 \text{ N} + 2,91\text{E-}04 \text{ S} + 0,35 \text{ H}_2\text{O} + 8,29 \text{ A} + 4,78 (\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)$ $\rightarrow 4,21 \text{ CO}_2 + 2,88 \text{ H}_2\text{O} + 2,91\text{E-}04 \text{ SO}_2 + 0,35 \text{ W} + 8,29 \text{ A} + 17,99 \text{ N}_2$

---